УНИФИЦИРОВАННАЯ СЕРИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИНТЕРЭЛЕКТРО

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

УНИФИЦИРОВАННАЯ СЕРИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИНТЕРЭЛЕКТРО

Под редакцией
доктора технических наук В.И. РАДИНА



МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
1990

ББК 31.261.63
У 59
УДК 621.313.333

Рецензент доктор техн. наук В.В. Домбровский

Авторы: В.И. Радин, Й. Лондин, В.Д. Розенкноп, Т.Г. Сорокер, Т. Сливински, Л. Кашински, М. Овчарова, Р. Гиншт, Т. Пальян, А.И. Каплин, Х. Леман, Ф. Муштер, Ю. Вольф, З. Бабетич, Л. Шевчик, К. Ковнацки, А.Э. Кравчик, Е.И. Малыхин, К.А. Алиханян, В. Спасов, А.Е. Загорский, Д. Кребер, Д. Шельмеци, Э.М. Гусельников, Ф.К. Макаров

У 59 **Унифицированная** серия асинхронных двигателей Интерэлектро/В.И. Радин, Й. Лондин, В.Д. Розенкноп и др.; Под ред. В.И. Радина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.: ил.

ISBN 5-283-00579-8

В рамках международной организации Интерэлектро специалистами НРБ, ВНР, ГДР, ПНР, СРР, СССР, ЧССР и СФРЮ была разработана унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро (АИ).

Результаты создания серии приведены в настоящей книге. Она является коллективным трудом ведущих специалистов социалистических стран. В книге изложены технические требования к современным сериям асинхронных двигателей, методики их оптимизации, расчета и конструирования, дано описание конструкции основных исполнений и модификаций серии, а также основных технологических решений, принятых при ее изготовлении.

Для инженерно-технических работников, занятых проектированием, изготовлением и эксплуатацией асинхронных двигателей.

У $\frac{2202070100\text{-}071}{051(01)\text{-}90}$ 272-89 ББК 31.261.63

Производственное издание

Радин Владимир Исаакович, Лондин Йозеф,
Розенкноп Владимир Давидович и др.

УНИФИЦИРОВАННАЯ СЕРИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИНТЕРЭЛЕКТРО

Редактор *Э.П. Клименко*. Зав. редакцией *М.П. Соколова*
Редактор издательства *Л.А. Решмина*
Художественные редакторы *В.А. Гозак-Хозак*, *Т.Н. Хромова*
Технический редактор *Т.Н. Тюрина*. Корректор *Л.А. Гладкова*

ИБ № 43

Набор выполнен в издательстве. Подписано в печать с оригинала-макета 19.03.90. Т-08205. Формат 60 x 88 1/16. Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Усл. печ.л. 25,48. Усл.кр.-отт. 25,48. Уч.-изд.л. 26,31. Тираж 10 000 экз. Заказ 6983. Цена 1 р. 60 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Отпечатано в ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО "Первая Образцовая типография" Государственного комитета СССР по печати. 113054, Москва, Валовая ул., 28.

ISBN 5-283-00579-8

ПРЕДИСЛОВИЕ

В рамках международной организации Интерэлектро, объединяющей электротехников социалистических стран, разработана серия асинхронных двигателей общего назначения, получившая название АИ.

Комплекс работ по созданию серии АИ включал в себя проведение значительного объема совместных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, охватывающих создание и исследование электротехнических материалов, разработку единых методик всех видов расчетов асинхронных двигателей с помощью ЭВМ, исследование процессов нагрева, охлаждения, шумов и вибраций, а также выбор наиболее рациональных конструкторских и технологических решений как основного исполнения, так и основных модификаций серии асинхронных двигателей.

В результате была спроектирована и в настоящее время широко осваивается в СССР и других социалистических странах серия АИ, отвечающая всем рекомендациям Международной электротехнической комиссии (МЭК) и имеющая весьма высокий технический уровень, позволяющий двигателям серии АИ широко выйти на мировой рынок.

Основные результаты проведенных работ по созданию серии АИ изложены в настоящей книге, которая является коллективным трудом специалистов НРБ, ВНР, ГДР, ПНР, СССР, ЧССР, СФРЮ.

Работа между авторами была распределена следующим образом: введение написал В.И. Радин (СССР); гл. 1 – Й. Лондин (ЧССР), В.И. Радин (СССР); гл. 2 – В.Д. Розенкноп (СССР); гл. 3 – Т.Г. Сорокер (СССР); гл. 4 – Т. Сливински (ПНР), Л. Кашински (ПНР), М. Овчарова (ПНР); гл. 5 – Р. Гиншт (ЧССР); гл. 6 – Т. Пальян (СФРЮ), А.И. Каплин (СССР); гл. 7 – Х. Леман (ГДР), Ф. Муштер (ГДР), Ю. Вольф (ГДР); § 8.1 – З. Бабетич (СФРЮ); § 8.4 – Л. Шевчик (ПНР), К. Ковнацки (ПНР); § 8.2, 8.3, 8.5, 8.6 – В.И. Радин (СССР), А.Э. Кравчик (СССР), Е.И. Малыхин (СССР), К.А. Алиханян (СССР); § 9.1, 9.2 – В. Спасов (НРБ); § 9.3, 9.4 – А.Э. Кравчик (СССР); § 9.5 – А.Е. Загорский (СССР); § 9.6 – Д. Кребер (ГДР); § 9.7 – Д. Шельмеци (ВНР); § 9.8 – Э.М. Гусельников (СССР); § 9.9, 9.10 – В.М. Радин (СССР); гл. 10 – Ф.К. Макаров (СССР).

Общее редактирование книги проведено доктором техн. наук В.И. Радиным.

Книга будет полезна для специалистов, занимающихся исследованием, проектированием, производством и эксплуатацией электродвигателей. Она также может быть использована студентами электромеханических специальностей при работе над курсовыми и дипломными проектами.

От имени авторов благодарю рецензента доктора техн. наук В.В. Домбровского, а также редактора Э.П. Клименко, взявших на себя непростой труд по рецензированию и редактированию книги, являющейся уникальным опытом сотрудничества международного авторского коллектива.

Лауреат Государственных премий СССР,
доктор технических наук, профессор В.И. Радин

ВВЕДЕНИЕ

Более 60% всей вырабатываемой в мире электроэнергии преобразуется в механическую, в основном, с помощью асинхронных двигателей (АД). Это объясняется простотой их конструкции, большей надежностью и высоким значением КПД. Созданные 100 лет назад русским ученым М.О. Доливо-Добровольским трехфазные АД нашли самое широкое распространение во всех отраслях промышленности, сельского хозяйства, торговли, транспорта и бытовой техники.

В социалистических странах АД изготовляются едиными национальными сериями.

Единые серии позволяют наиболее полно обеспечить специализацию и широкую кооперацию, централизовать производство технологической оснастки и инструмента. При этом значительно облегчаются выбор, установка, ремонт и обслуживание электродвигателей.

Осуществляя широкую программу социалистической и экономической интеграции, в 1975 г. в рамках международной организации Интерэлектро НРБ, ВНР, ГДР, ПНР, СРР, ЧССР, СФРЮ было подписано соглашение о научно-техническом сотрудничестве в области разработки и освоения унифицированной серии АД напряжением до 1000 В.

Для координации комплекса работ по проектированию серии был создан Объединенный научно-технический совет по АД (ОНТС АД), который раз в год собирается по очереди в странах-участницах Интерэлектро. Ежегодно в СССР проводится также заседание объединенного конструкторско-технологического бюро (ОКТБ).

Согласованной комплексной программой работ по созданию серии, которая получила название АИ (асинхронные двигатели Интерэлектро), были предусмотрены совместное проведение научно-исследовательских работ (НИР), разработка эскизного и технического проектов основного исполнения и модификаций, разработка технологии изготовления АД и технических заданий на технологическое оборудование и комплектующие изделия, разработка стандарта СЭВ и пр. (рис. В.1). Все работы велись по утвержденному Советом Интерэлектро сетевому графику.

Первоначально были разработаны предварительные технические задания на материалы, конструкцию АД, технологии их изготовления. Задания были затем уточнены по результатам совместных НИР.

В области конструирования АД были проведены НИР по исследованию шумов и вибраций, нагрева и охлаждения, добавочных потерь, ра-

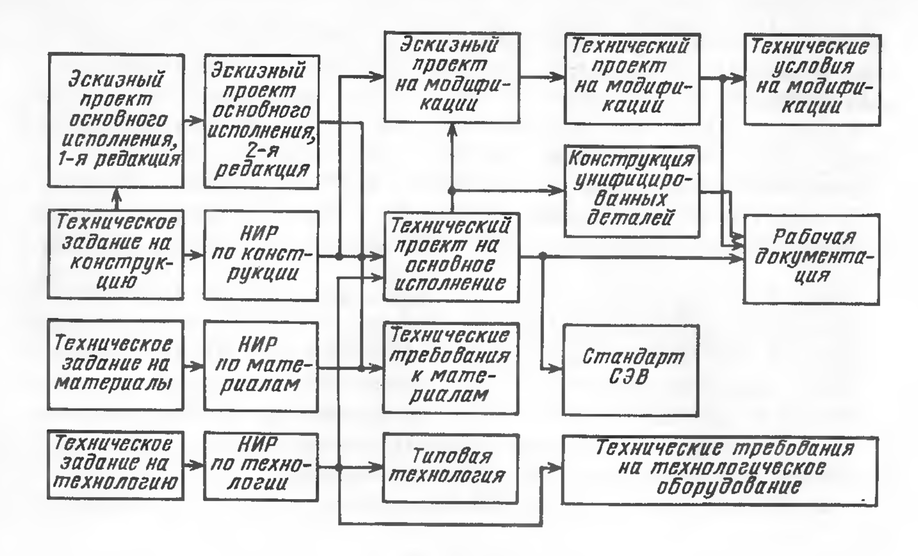


Рис. В.1. Этапы разработки серии АИ

циональному выбору подшипниковых узлов, по выбору коэффициента заполнения паза, по повышению надежности. Были также исследованы различные модификации основного исполнения серии: однофазные, со встроенной температурной защитой, с электромагнитным тормозом, для регулируемых электроприводов, защищенные, с фазным ротором, многоскоростные. Проведены НИР по наиболее рациональной увязке рядов мощностей и установочных размеров, способам монтажа.

В рамках НИР этого направления были разработаны единые методики расчетов АД: электромагнитного, добавочных потерь, тепловентиляционного, шумов и вибраций, надежности, механических, оптимального проектирования. Программирование осуществлялось для ЭВМ единой системы (ЕС ЭВМ) СЭВ.

В рамках НИР по электротехническим материалам разработана единая методика, проведены исследования и даны рекомендации по выбору марок электротехнических сталей, режимам их термической обработки, электроизоляционным покрытиям. Рассмотрены вопросы штампуемости электротехнической стали. Проведены исследования и разработаны рекомендации по выбору проводов, систем изоляции, пропиточных составов.

По каждой теме НИР были определены страны-координаторы. Результаты НИР в соответствии с заключенным соглашением использовались всеми странами-участницами Интерэлектро безвозмездно.

При работе ОКТБ также распределялись обязанности между странами-участницами Интерэлектро по предварительной конструкторской проработке того или иного узла АД, той или иной модификации.

Таким образом, унифицированная серия АИ создана коллективным трудом специалистов всех стран-участниц Интерэлектро.

Страной-координатором по созданию серии АИ был СССР.

В создании серии АИ принимали участие ведущие специалисты социалистических стран.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

1.1. МЕЖДУНАРОДНАЯ СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Широкое развитие международной торговли электротехническими изделиями вызвало необходимость в международной стандартизации. С 1906 г. действует Международная электротехническая комиссия (МЭК) (International Electrotechnical Comission IEC), в задачу которой входит разработка рекомендаций по стандартизации параметров и характеристик электротехнических изделий. В состав МЭК входит 81 технический комитет (ТС), каждый из которых ведет работу по определенному виду электротехнических изделий. Для решения отдельных проблем созданы подкомитеты (SC). В табл. 1.1 приведен перечень комитетов и подкомитетов, занимающихся вопросами стандартизации АД напряжением до 1000 В.

Все публикации, разработанные в рамках МЭК, носят рекомендательный характер, но, как правило, они находят отражение в национальных стандартах.

Перечень Публикаций МЭК, относящихся к АД, приведен в табл. 1.2.

Важнейшее значение для международной торговли имеет стандартизация рядов установочных размеров и мощностей, а также увязка между ними. Особенно это важно для АД, являющихся основой электропривода большинства механизмов.

Самым старым стандартом в этой области был стандарт США NEMA (Американское общество инженеров). Еще в 1929 г. этим стандартом был установлен ряд установочных размеров станин, связанный с рядом номинальных мощностей АД.

В Публикации МЭК 72 (1956 г.) были рекомендованы ряды мощностей и установочных размеров для всех вращающихся электрических машин. При этом за основу был принят стандарт NEMA с переводом дюймовой системы в метрическую и лошадиных сил в киловатты. Однако Публикация МЭК 72 не содержала увязки рядов мощностей и установочных размеров.

В 1958 г. была согласована первая рекомендация СЭВ по увязке указанных рядов для АД. В 1959 г. был издан стандарт ФРГ DIN, также содержащий увязку рядов мощностей и установочных размеров, которая в дальнейшем была принята всеми странами, объединенными в Организацию по стандартизации электротехнических изделий стран Западной Европы (CENELEC).

Таблица 1.1

Технический комитет		Подкомитеты	
Номер	Наименование	Условное обозначение	Наименование
2	Вращающиеся электрические машины	2B	Размеры вращающихся электрических машин
		2F	Щетки, щеткодержатели, коллекторы и контактные кольца
		2H	Степени защиты оболочками. Методы охлаждения
		2V	Классификация систем изоляции для вращающихся электрических машин
15	Изоляционные материалы	15A	Кратковременные испытания
		15B	Долговременные испытания
		15C	Спецификация
50	Испытания на воздействие окружающей среды	50A	Ударные и вибрационные испытания
		50B	Климатические испытания
		50C	Различные испытания на воздействие окружающей среды
		50D	Испытания на взрывозащищенность
55	Обмоточные провода	–	–
56	Надежность и уход	–	–
63	Системы изоляции	–	–
68	Магнитные сплавы и стали	–	–
70	Защита	–	–
75	Классификация окружающей среды	–	–

Таблица 1.2

Публикация	Наименование
МЭК 34-6	Вращающиеся электрические машины. Часть 6. Метод охлаждения вращающихся машин
МЭК 34-7	Вращающиеся электрические машины. Часть 7. Обозначения для типов конструкций и монтажных устройств вращающихся электрических машин
МЭК 34-8	Вращающиеся электрические машины. Часть 8. Маркировка выводов и направлений вращения вращающихся машин
МЭК 34-1	Вращающиеся электрические машины. Часть 1. Номинальные данные и эксплуатационные характеристики
МЭК 279	Измерение сопротивления обмоток машин переменного тока при работе на переменном напряжении
МЭК 34-14	Вращающиеся электрические машины. Часть 14. Механическая вибрация некоторых машин с высотой вала от 56 мм и выше. Измерение, оценка и пределы интенсивности вибрации

Таблица 1.2 (продолжение)

Публикация	Наименование
МЭК 34-2	Вращающиеся электрические машины. Часть 2. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия вращающихся электрических машин (за исключением машин для подвижного состава)
МЭК 34-5	Машины электрические вращающиеся. Степени защиты вращающихся электрических машин оболочками
МЭК 34-9	Вращающиеся электрические машины. Часть 9. Нормы на шум. Размеры и номинальные мощности вращающихся электрических машин с высотами оси вращения 56–400 мм и с фланцами F55–F1080
МЭК 34-11	Вращающиеся электрические машины. Часть 11. Встроенная тепловая защита. Глава 1. Правила защиты вращающихся электрических машин. Глава 2. Термодатчики и контрольные устройства, используемые в системах термозащиты
72-1	Размеры и номинальные мощности электрических машин. Часть 1. Электрические машины на лапах с высотой оси вращения 56–315 мм ($2\frac{5}{8}$ – $12\frac{1}{2}$ дюйма)
34-12	Вращающиеся электрические машины. Часть 12. Пусковые характеристики односкоростных трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором напряжением до 660 В включительно

В 1968 г. странами СЭВ была согласована увязка рядов мощностей и установочных размеров, которая затем нашла отражение в рекомендациях СЭВ РС-3031. Эта увязка была положена в основу национальных серий СССР (4А), ГДР (КМР) и ряда других стран СЭВ.

Таким образом, в 70-х годах сложились три увязки рядов мощностей и установочных размеров: СТ СЭВ, CENELEC и NEMA (табл. 1.3).

Последняя Публикация МЭК 72 содержит рекомендации по четырем не связанным друг с другом рядам: номинальных мощностей, размеров машин на лапах, размеров крепительных фланцев и свободных концов вала. Рекомендации эти создавались в течение 20 лет и содержат ряд компромиссных решений, учитывающих перевод дюймовой системы в метрическую и лошадиных сил в киловатты. Публикацией предусмотрено два ряда мощностей, кВт: основной – 0,06; 0,09; 0,12; 0,18; 0,25; 0,37; 0,55; 0,75; 1,1; 1,5; 2,2; 3,7; 5,5; 7,5; 11; 15; 18,5; 22; 30; 37; 45; 55; 75; 90; 110; 132; 150; 160; 185; 200; 220; 250 и дополнительный – 1,8; 3; 4; 6,3; 10; 13; 17; 20; 15; 33; 40; 50; 63; 80; 100; 125.

Основной ряд неравномерен для мощностей до 132 кВт: отношение между соседними значениями мощностей (коэффициент нарастания

Таблица 1.3

Условное обозначение установочных размеров			Номинальная мощность, кВт											
			2p = 2				2p = 4			2p = 6			2p = 8	
МЭК														
Высота оси вращения	Длина станины	NEMA	NEMA	CENELEC	СТ СЭВ	NEMA	CENELEC	СТ СЭВ	NEMA	CENELEC	СТ СЭВ	NEMA	CENELEC	СТ СЭВ
56	–	–	–	0,09; 0,12	0,18; 0,25	–	0,06; 0,04	0,12; 0,18	–	–	–	–	–	–
63	–	–	–	0,18; 0,25	0,37; 0,55	–	0,12; 0,18	0,25; 0,37	–	–	0,18; 0,25	–	–	–
71	–	–	–	0,36–0,55	0,75; 1,1	–	0,25; 0,37	0,55; 0,75	–	–	0,37; 0,55	–	–	0,25
80	–	–	–	0,75; 1,1	1,5; 2,2	–	0,55; 0,75	1,1; 1,5	–	0,37; 0,55	0,75; 1,1	–	–	0,37–0,55
90	S	143 T	1,1	1,5	–	0,75	1,1	–	0,55	0,75	–	0,37	0,37	
	L	145 T	1,5	2,2	3	1,1; 1,5	1,5	2,2	0,75	1,1	1,5	0,55	0,55	0,75; 1,1
100	S	–	–	–	4	–	–	3	–	–	–	–	–	–
	L	–	–	3	5,5	–	2,2; 3	4	–	1,5	2,2	–	0,75–1,1	1,5
112	S	182 T	2,2	–	–	2,2	–	–	1,1	–	–	0,75	–	–
	M	184 T	3,7	4	7,5	3,7	4	5,5	1,5	2,2	3; 4	1,1	1,5	2,2; 3
	L	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
132	S	213 T	5,5	5,5; 7,5	–	5,5	5,3	7,5	2,2	3	5,5	1,5	2,2	4
	M	215 T	7,5	–	11	7,5	7,5	11	3,7	4; 5,5	7,5	2,2	3	5,6
	L	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
160	S	–	–	–	15	–	–	15	–	–	11	–	–	7,5
	M	254 T	11	11; 15	18,5	11	11	18,5	5,5	7,5	15	3,7	4–5,5	11
	L	256 T	15	18,5	–	15	15	–	7,5	11	–	5,5	7,5	–
180	S	–	–	–	22	–	–	22	–	–	–	–	–	–

Т а б л и ц а 1.3 (окончание)

Условное обозначение установочных размеров МЭК: Высота оси вращения	Длина станины	NEMA	Номинальная мощность, кВт: 2p = 2, NEMA	2p = 2, CENELEC	2p = 2, СТ СЭВ	2p = 4, NEMA	2p = 4, CENELEC	2p = 4, СТ СЭВ	2p = 6, NEMA	2p = 6, CENELEC	2p = 6, СТ СЭВ	2p = 8, NEMA	2p = 8, CENELEC	2p = 8, СТ СЭВ
180	M	284 T	18,5	22	30	18,5	18,5	30	11	–	18,5	7,5	–	15
	L	286 T	22	–	–	22	22		15	15	–	11	11	
	S	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
200	M	324 T	30	–	37	30	–	37	18,5	–	22	15		18,5
	L	326 T	37	30; 37	45	37	30	45	22	18,5; 22	30	18,5	15	22
	S	364 T	45	–	–	45	37		30	–	–	22	18,5	
225	M	365 T	55	45	55	55	45	55	37	30	37	30	22	30
	L	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	S	404 T	–	–	75	–	–	75	45	–	45	37		37
250	M	405 T	75	55	90	75	55	90	55	37	55	45	30	45
	L	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	S	444 T	90	75	110	90	75	110	75	45	75	55	37	55
280	M	445 T	110	90	132	110	90	132	90	56	90	75	45	75
	L	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	S	–	–	110	160	–	110	160	–	75	110	–	55	90
315	M	–	–	132	200	–	132	200	–	90	132	–	75	110
	L	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	S	–	–	–	250	–	–	250	–	–	160	–	–	132
355	M	–	–	–	315	–	–	315	–	–	200	–	–	160
	L	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

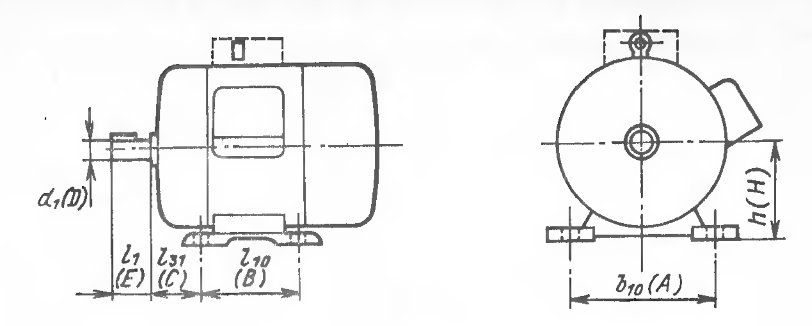


Рис. 1.1. Основные установочные размеры электрических машин на лапах и их обозначение по РС и МЭК-72 (в скобках)

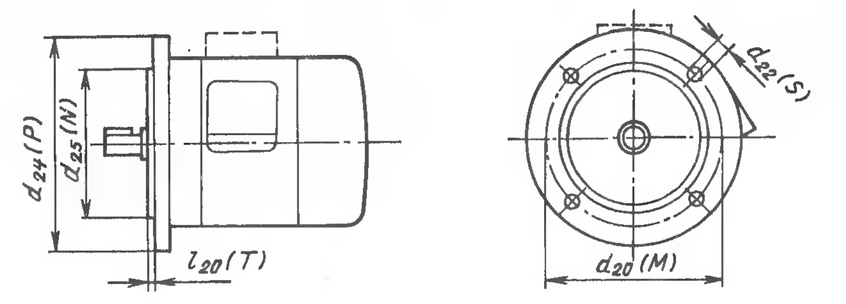


Рис. 1.2. Основные установочные размеры фланцев электрических машин и их обозначение по РС и МЭК-72 (в скобках)

мощности) изменяется от 1,19 до 1,58. В диапазоне мощностей от 132 до 250 кВт коэффициент нарастания 1,112, а свыше 250 кВт – 1,25.

Рекомендации МЭК по рядам основных установочных размеров *H, A, B, C* (рис. 1.1) также неравномерны (табл. 1.4): так, высоты оси вращения *H* в диапазоне от 56 до 112 мм включительно взяты из рядов предпочтительных чисел *R*20, рекомендованных Международной организацией по стандартизации ISO, а высоты оси вращения 132 и 160 мм – из ряда *R*10, а для высот осей вращения 180–400 мм – опять из ряда *R*20.

В высоте оси вращения до 80 мм предусмотрена одна длина станины – размер B, в высотах 80, 90 мм – две длины: S, M, при $H > 90$ мм – три длины: S, M, L (табл. 1.4).

Публикация МЭК 72 предусматривает два ряда размеров фланцев: один ряд размеров – в миллиметрах для фланцев с отверстиями без резьбы (FF) и с резьбой (FT) с диаметром *M* (рис. 1.2), второй ряд размеров – в дюймах для фланцев с отверстиями без резьбы (FF). Ряды размеров фланцев не согласованы с рядом высот оси вращения.

Таблица 1.4

Условное обозначение установочных размеров	H, мм	A, мм	B, мм	C, мм	Условное обозначение установочных размеров	H, мм	A, мм	B, мм	C, мм
56	56	90	71	36	200S			228	
63	63	100	80	40	200M	200	318	267	133
71	71	112	90	45	200L			305	
80	80	125	100	50	225S			286	
90S	90	140	100	56	225M	225	356	311	149
90L			125		(225L)			356	
100S	100	160	112	63	250S			311	
100L					250M	250	406	349	168
112S			114		(250L)			406	
112M	112	190	140	70	280S			368	
(112L)			159		280M	280	457	419	190
132S			140		(280L)			457	
132M	132	216	178	89	315S			406	
(132L)			203		315M	315	508	457	216
160S			178		(315L)			508	
160M	160	254	210	108	355S			500	
(160L)			254		355M	355	610	560	254
180S			203		355L			630	
180M	180	279	241	121	400S			560	
180L			279		400M	400	686	630	280
					400L			710	

Примечание. Установочные размеры в скобках не рекомендуются для АД.

Все эти недостатки Публикации МЭК 72 для рядов мощностей и установочных размеров, а также отсутствие их увязки не способствуют созданию оптимальных серий АД. Поэтому страны СЭВ, сначала в рамках секции 10 Постоянного комитета по стандартизации (ПКС) СЭВ, а затем в рамках Интерэлектро, согласовывая между собой совместные действия, активно выступали в органах МЭК по вопросам совершенствования рекомендаций МЭК в части рядов мощностей и установочных размеров, а также их увязки.

Странами-участницами Интерэлектро было предложено принять Международную систему единиц (мощность – в киловаттах, размеры – в миллиметрах), а также предпочтительные числа, рекомендованные ISO. Было предложено все установочные размеры взять из ряда предпочтительных чисел $R40$ с уточнением по ряду $R20$. Рекомендовалась для лучшего согласования рядов следующая зависимость номинальной мощности машины P от основных установочных размеров H и B (см. рис. 1.1) при определенном числе полюсов:

$$K = (H^2 B^n)/P, \qquad (1.1)$$

где коэффициент K можно считать постоянным для некоторого диапазона мощностей, а показатель n для этого же диапазона рассчитывать как

$$n = \frac{\lg(P_2/P_1)}{\lg(H^2B)_1/(H^2B)_2}, \qquad (1.2)$$

где индекс 1 относится к нижнему пределу мощностей P_1, а индекс 2 – к верхнему P_2.

Для малых АД в закрытом исполнении $n = 2$, для средних $n = 1{,}3$, для крупных $n = 1{,}1 \div 1{,}2$.

Если принять, что ряд мощностей является геометрической прогрессией со знаменателем

$$p = 10^{1/a}, \qquad (1.3)$$

а ряд высот оси вращения – также геометрической прогрессией со знаменателем

$$h = 10^{1/c}, \qquad (1.4)$$

то коэффициенты a и c можно назвать плотностями этих рядов. Если в каждой высоте оси вращения предусматривается m мощностей, а размер B для коротких S, средних M и длинных L корпусов определяется соотношением

$$B_S/H = \text{const}; \quad B_M/H = \text{const}; \quad B_L/H = \text{const}, \qquad (1.5)$$

то плотности ряда мощностей и ряда высот оси вращения связаны зависимостью

$$c = 3an/m. \qquad (1.6)$$

Для получения закономерной структуры серии электрических машин необходимо так подобрать ряды мощностей и установочных размеров, чтобы были выдержаны зависимости (1.5) и (1.6). Например, для АД средних мощностей при $K = 1{,}33$ и при двух мощностях в каждой высоте оси вращения ($m = 2$) стройную структуру серии можно получить, приняв плотность ряда высот оси вращения $c = 20$ (ряд $R20$) и плотность ряда мощностей $a = 10$ (ряд $R10$).

По инициативе стран СЭВ в 1970 г. в органах МЭК началось обсуждение вопросов по разработке новых рядов мощностей и установочных размеров, чтобы в дальнейшем принять также решение об их единой увязке. Для этого была создана рабочая группа № 3 Подкомитета 2В МЭК. Однако из-за позиции западных стран работа рабочей группы была фактически сорвана и она прекратила свое существование. Тем не менее следует отметить, что на последнем заседании в 1977 г. рабочая

группа согласовала ряд мощностей свыше 20 кВт: 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315 кВт, а также ряд мощностей на участке от 0,1 до 0,8 кВт: 0,1; 0,14; 0,2; 0,28; 0,4; 0,56; 0,65; 0,8 кВт. Была также в основном согласована нижняя часть ряда мощностей от 1 до 20 кВт: 1,1; 1,6; 2,2; 3,2; 4,5 кВт. Однако для больших мощностей этого диапазона общую точку зрения найти не удалось. Страны-участницы Интерэлектро предлагали значения мощностей 6, 8, 11, 15 кВт, ФРГ – 6,3; 9; 12,5; 16 кВт.

Страны-участницы Интерэлектро предложили ряд высот оси вращения 50, 56, 63, 71, 80, 95, 112, 132, 160, 190, 225, 250, 280, 315, 355 мм и увязку этого ряда с рядом мощностей, представленную в табл. 1.5 для АД со степенью защиты IP44. Четырехполюсные двигатели в каждой высоте оси вращения имеют по две мощности, чем достигается равномерность структуры серии (табл. 1.6).

В рабочей группе № 3 МЭК обсуждался также вопрос изменения установочных размеров. Было согласовано, что значения размеров A и C будут выбираться из ряда предпочтительных чисел $R40$, значение размера B – из ряда $R20$ (см. рис. 1.1). Специалисты стран-участниц Интерэлектро были в основном согласны с этими принципами, но в отношении размера B считали целесообразным в случае необходимости использовать остальные числа из ряда $R40$.

Таблица 1.5

Высота оси вращения, мм	Номинальная мощность, кВт			
	$2p = 2$	$2p = 4$	$2p = 6$	$2p = 8$
50	0,1 0,14	0,071 0,1	–	–
56	0,2 0,28	0,14 0,2	–	–
63	0,4 0,56	0,28 0,4	0,2 0,28	–
71	0,8 1,1	0,56 0,8	0,4 0,56	–
80	1,6 2,2	1,1 1,6	0,8 1,1	0,4 0,56
95	3,2 4,5	2,2 3,2	1,6 2,2	0,8 1,1
112	6 8	4,5 6	3,2 4,5	1,6 2,2 3,2
132	– 11	8 11	6 8	4,5 6

Высота оси вращения, мм	Номинальная мощность, кВт			
	$2p = 2$	$2p = 4$	$2p = 6$	$2p = 8$
160	15 20	15 20	11 15	8 11
190	27 36	27 36	20	15
225	45 56	45 56	27 36	20 27
250	71 90	71 90	45 56	36 45
280	110 132	110 132	71 90	56 71
315	160 200	160 200	110 132	90 110
355	250 315	250 315	160 200	132 160

Таблица 1.6

Диапазон высот оси вращения, мм	Диапазон номинальных мощностей, кВт, при $2p = 4$	Средняя плотность рядов		Коэффициент K
		высот оси вращения c	номинальных мощностей a	
50–88	0,071–1,1	19,6	6,66	1,96
80–112	1,1–4,5	13,7	6,54	1,40
112–190	4,5–25	13,1	8,06	1,08
190–225	25–40	13,6	9,80	0,93
225–355	40–315	20,2	10,1	1,33

Подробно обсуждался также вопрос об отношении размеров A/H, B/H, C/H. Странами-участницами Интерэлектро в качестве наиболее целесообразных предлагались значения отношений $A/H = 1{,}68$, $C/H = 0{,}708$, а отношение B/H для всех высот оси вращения, начиная с 63 мм, должно иметь два значения, лежащие в пределах 0,8–1,6. Западные страны предлагали $A/H = 1{,}8$, $C/H = 0{,}75$.

Размеры фланцев и свободных концов валов несмотря на большую дискуссию были оставлены такими же, как в Публикации МЭК 72.

Таблица 1.7

Стандарт СЭВ (СТ СЭВ)	Наименование
246-76	Машины электрические вращающиеся. Условное обозначение конструктивных исполнений по способу монтажа
247-76	Машины электрические вращающиеся. Степень защиты
458-77	Климатическое районирование земного шара для технических целей
460-77	Виды климатических исполнений технических изделий
1346-78	Машины электрические вращающиеся. Общие технические требования
1348-78	Машины электрические вращающиеся. Допустимые уровни шума
1367-78	Вибрации машин с рабочей частотой вращения от 10 до 200 $с^{-1}$ Основные указания для определения интенсивности вибрации
1951-79	Машины электрические вращающиеся. Концы валов цилиндрические. Основные размеры. Допускаемые крутящие моменты
2412-80	Машины электрические вращающиеся. Допустимые значения и методы оценки вибрации
4744-84	Электродвигатели трехфазные асинхронные с короткозамкнутым ротором с высотами оси вращения от 45 до 355 мм, напряжением до 660 В. Основные параметры, размеры и технические требования

Значительная работа в рамках рабочей группы № 3 Подкомитета 2В была проведена по согласованию допусков на установочные размеры. Однако несмотря на то, что согласованные предложения по допускам на установочные размеры были разосланы Подкомитетом 2В, решение по этому вопросу до сих пор не принято.

Таким образом, в настоящее время действует Публикация МЭК 72 с несовершенными рядами мощностей, установочных размеров и без их увязки. Однако страны-участницы Интерэлектро продолжают ставить в органах МЭК вопрос о необходимости совершенствования рекомендаций в части рядов мощностей, установочных размеров и о необходимости разработки единой мировой увязки этих рядов.

Работы по стандартизации в области АД в рамках СЭВ начались еще в 60-х годах. Постоянный Комитет по стандартизации (ПКС) СЭВ осуществил широкую программу по разработке рекомендаций по стандартизации (РС), а затем и стандартов СЭВ в области вращающихся электрических машин, в том числе и АД. В табл. 1.7 приведен перечень стандартов СЭВ, касающихся АД.

Как правило, стандарты СЭВ учитывают все рекомендации, изложенные в Публикациях МЭК.

Требования стандартов СЭВ обязательно отражаются в национальных стандартах стран-участниц СЭВ, подписавших соответствующие стандарты СЭВ.

В рамках Интерэлектро был разработан, согласован, а затем в 1982 г. ПКС СЭВ утвержден СТ СЭВ 4744-84, который содержит основные общие требования к АД серии АИ.

1.2. СТРУКТУРА СЕРИИ, СТЕПЕНИ ЗАЩИТЫ И СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

В серии предусмотрены основное исполнение, а также электрические модификации и специализированные исполнения по условиям окружающей среды, по точности установочных размеров, с дополнительными устройствами, узкоспециализированные.

Ряд модификаций разработан в рамках ОНТС АД Интерэлектро: с повышенным скольжением, многоскоростные, однофазные, малошумные, с фазным ротором, с электромагнитным тормозом. Остальные модификации разработаны отдельными странами в зависимости от их потребности.

На рис. 1.3 показана схема модификаций первого порядка унифицированной серии, принятых в СССР. Следует отметить, что кроме модификаций первого порядка есть модификации второго, третьего и более высоких порядков, например АД многоскоростной, тропический, со встроенным тормозом и др.

Степени защиты оболочек электрических машин установлены Публикацией МЭК 34-5 и соответствующим ей СТ СЭВ 247-76 и определяются в зависимости:

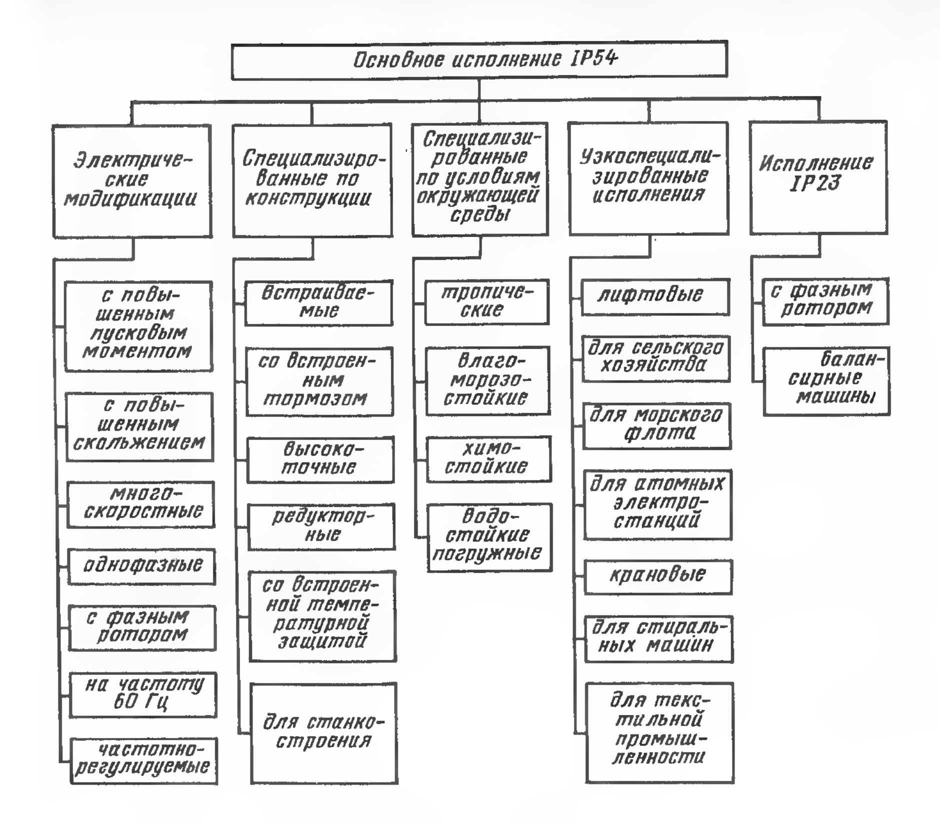


Рис. 1.3. Модификации серии АИ

от защищенности обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими или движущимися частями, находящимися внутри оболочки, и от попадания внутрь машины твердых посторонних тел;

от защищенности от вредного влияния, вызванного проникновением воды.

Степени защиты обозначаются символом IP и двумя цифрами, определяющими защищенность по приведенным выше видам.

Двигатели в закрытом исполнении обычно производились и производятся в серии АИ со степенью защиты IP54 либо IP44. Первая цифра 4 обозначает, что оболочка защищает машину от попадания внутрь твердых тел с диаметром большим, чем 1 мм, и от прикосновения токоведущих или движущихся частей с прутком диаметром большим, чем 1 мм. Первая цифра 5 соответствует полной защите персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями; пыль, попадая внутрь машины, не нарушает ее нормальную работу.

Вторая цифра 4 обозначает, что вода в виде брызг, попадая на машину в любом направлении, не может вредно повлиять на ее работу.

Вводное устройство АД должно быть выполнено со степенью защиты не ниже IP54.

Двигатели со степенью защиты IP54 или IP44 являются основным исполнением для всей серии. На участке высот оси вращения 200 мм и выше принято второе исполнение по степени защиты – IP23. Оболочка этих АД (соответственно первая цифра 2) защищает машину от попадания внутрь твердых тел с диаметром более 12,5 мм и от случайного прикосновения к токоведущим (или движущимся) частям пальцем или предметами длиной не более 80 мм. Согласно второй цифре 3 вода в виде брызг, падая на машину под углом не более 60° к вертикали, не должна оказывать вредного влияния на работу машины. Для АД, работающих с вертикальным положением вала, допускается исполнение со степенью защиты IP22. Вторая цифра 2 обозначает, что оболочка защищает машину от попадания внутрь капель воды, падающих под углом не более 15° к вертикали. Вводное устройство этих АД должно быть выполнено со степенью защиты IP44 или IP54.

Классификация способов охлаждения установлена Публикацией МЭК 34-6 и СТ СЭВ 246-76. Способ охлаждения обозначается символом IC и последующими цифрами. Двигатели со степенью защиты IP54, IP44 выполняются со способом охлаждения IC0141. Первые две цифры (01) определяют, что внешняя поверхность машины обдувается вентилятором, посаженным на вал машины и охлаждающим машину окружающим воздухом через ее оболочку. Следующие две цифры (41) относятся к внутренней части машины и обозначают, что воздух внутри машины приводится в движение самим ротором или дополнительным внутренним вентилятором и что тепло передается внутри машины окружающей среде через поверхность станины, которая может быть гладкой или с ребрами.

Для АД с высотой оси вращения 45 мм предусмотрена возможность применения способа охлаждения IC0041, который отличается от предыдущего отсутствием внешнего вентилятора; теплота с поверхности станины отводится свободной конвекцией. Для АД с высотами оси вращения 280 – 355 мм предусматривается также способ охлаждения IC0151, при котором обмен теплотой между воздухом внутри и вне машины происходит с помощью встроенного охладителя. Двигатели в исполнении IP23 должны иметь способ охлаждения IC01.

1.3. КОНСТРУКТИВНЫЕ ИСПОЛНЕНИЯ ПО СПОСОБУ МОНТАЖА

Классификация конструктивных исполнений электрических машин по способу монтажа дана в Публикации МЭК 34-7 и в СТ СЭВ 246-76. Согласно этим документам конструктивное исполнение электрической машины обозначается символом IM и четырьмя цифрами.

Таблица 1.8

Основное исполнение по способу монтажа	Участок высот оси вращения, мм, при увязке по варианту		Дополнительные конструктивные исполнения
	Р	С	
IM1001	45–250	56–280	IM1011–IM1071
IM1001	280–355	280–315	–
IM2001	45–250	56–280	IM2011–IM2071
IM2001	280–355	280–315	–
IM2101	45–100	56–112	IM2111–IM2171
IM3001	45–180	56–200	IM3011–IM3031
IM3601	45–100	56–112	IM3611–IM3631
IM3011	200–355	225–315	IM3031

Первая цифра определяет группу конструктивных исполнений. Серия АД Интерэлектро производится по трем группам исполнений:

на лапах, с подшипниковыми щитами (цифра 1);

на лапах, с подшипниковыми щитами и с фланцем на подшипниковом щите или щитах (цифра 2);

без лап, с подшипниковыми щитами и с фланцем на одном подшипниковом щите (цифра 3).

Вторая и третья цифры обозначают способ монтажа, а четвертая цифра – исполнение конца вала. Все АД серии изготовляются в основном с одним цилиндрическим концом вала (цифра 1), а по мере потребности – с двумя цилиндрическими концами вала (цифра 2). Двигатели первой группы с высотами оси вращения 280 – 355 мм с двумя подшипниковыми щитами (вторая цифра 0) предназначены для монтажа с лапами вниз (третья цифра 0). Двигатели с малой и средней высотами вращения могут монтироваться с любым направлением вала и лап (третья цифра 1 – 7).

Двигатели на лапах, с фланцем (первая цифра 2) имеют два типа фланцев: фланец большого диаметра, доступный с обратной стороны, с крепящими отверстиями без резьбы (вторая цифра 0) и фланец малого диаметра, недоступный с обратной стороны, с крепящими отверстиями с резьбой (вторая цифра 1). Основное положение вала – горизонтальное с лапами внизу (третья цифра 0). Дополнительно АД могут быть применены с вертикальным направлением конца вала вниз (третья цифра 1) или вверх (третья цифра 3).

Диапазоны высот оси вращения для конструктивных исполнений по способу монтажа приведены в табл. 1.8.

1.4. РЯДЫ МОЩНОСТЕЙ И УСТАНОВОЧНЫХ РАЗМЕРОВ, ИХ УВЯЗКА

Ряды мощностей и установочных размеров выбраны в полном соответствии с Публикацией МЭК 72.

Ряд мощностей: 0,025; 0,04; 0,06; 0,09; 0,12; 0,18; 0,25; 0,37; 0,55; 0,75; 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 5,5; 7,5; 11; 15; 18,5; 22; 30; 37; 45; 55; 75; 90; 110; 132; 160; 200; 250; 315; 400 кВт.

Ряд высот оси вращения: 45; 50; 56; 63; 71; 80; 90; 100; 112; 132; 160; 180; 200; 225; 250; 280; 315; 355 мм.

Основные установочные и присоединительные размеры, привязанные к высотам оси вращения, для АД на лапах были даны в табл. 1.4.

Размеры фланцев приведены в табл. 1.9.

Увязка номеров фланцев и размеров рабочих концов валов с высотами оси вращения дана в табл. 1.10.

Как уже отмечалось выше, до настоящего времени в МЭК не принято решение по единой увязке рядов мощностей и высот оси вращения, поэтому для унифицированной серии были приняты в соответствии с СТ СЭВ 4744-84 два варианта увязки: Р и С. Первый вариант соответствует увязке, ранее принятой СЭВ, второй – CENELEC.

Таблица 1.9

Номер фланца	M, мм	N, мм	P, мм	Число отверстий	Диаметр S отверстий: без резьбы, мм	Диаметр S отверстий: с резьбой	T_{max}, мм
FF55, FT55	55	40	70	4	5,8	M5	2,5
FF65, FT65	65	50	80	4	5,8	M5	2,5
FF75, FT75	75	60	90	4	5,8	M5	2,5
FF85, FT85	85	70	105	4	7	M6	2,5
FF100, FT100	100	80	120	4	7	M6	3
FF115, FT115	115	95	140	4	10	M8	3
FF130, FT130	130	110	160	4	10	M8	3,5
FF165, FT165	165	130	200	4	12	M10	3,5
FF215, FT215	215	180	250	4	15	M12	4
FF265, FT265	265	230	300	4	15	M12	4
FF300, FT300	300	250	350	4	19	M16	5
FF350, FT350	350	300	400	4	19	M16	5
FF400, FT400	400	350	450	8	19	M16	5
FF500, FT500	500	450	550	8	19	M16	5
FF600, FT600	600	550	660	8	24	M20	6
FF740, FT740	740	680	800	8	24	M20	6

Примечание. Обозначения размеров фланцев – по рис. 1.2.

Таблица 1.10

Высота оси вращения, мм	Номер фланца при увязке по варианту		Размер рабочего конца вала, мм, при увязке по варианту							
			Р				С			
			d_1 (D)		L_1 (E)		d_1 (D)		L_1 (E)	
	Р	С	2p=2	2p≥4	2p=2	2p≥4	2p=2	2p≥4	2p=2	2p≥4
45	FF85 FT65	–	7		16		–		–	
50	FF100 FT55; FT75	–	9		20		–		–	
56	FF115 FT65; FT85	FF100 FT65; FT85	11		23		9		20	
63	FF130 FT75; FT100	FF115 FT75; FT100	14		30		11		23	
71	FF165 FT85; FT115	FF130 FT85; FT115	19		40		14		30	
80	FF165 FT100; FT130	FF165 FT100; FT130	24		50		19		40	
90	FF215 FT115; FT130	FF165 FT115; FT130	24		50		24		50	
100	FF215 FT130; FT165	FF215 FT130; FT165	28		60		28		60	
112	FF265	FF215 FT130; FT165	32		80		28		60	
132	FF300	FF265	38		80		38		80	
160	FF300	FF300	42	48	110		42		110	
180	FF350	FF300	48	55	110		48		110	
200	FF400	FF350	55	60	110	140	55		110	
225	FF500	FF400	55	65	110	140	55	60	110	140
250	FF500	FF500	65	75	140		60	65	140	
280	FF600	FF500	70	80	140	170	65	75	140	
315	FF600	FF600	75	90	140	170	65	80	140	170
355	FF740	–	85	100	170	210	–	–	–	–

Примечание. Обозначения размеров рабочего конца вала – по рис. 1.1.

В табл. 1.11 приведены оба принятых варианта увязки для всех чисел полюсов и исполнения по степени защиты IP54(44). Как видно из табл. 1.11, в варианте Р мощность АД при одной и той же высоте оси вращения в основном на одну ступень выше, чем мощность при варианте С. Это позволяет максимально унифицировать между собой оба ис-

Таблица 1.11

Условное обозначение установочных размеров	Номинальная мощность, кВт, при увязке по варианту									
	P						C			
	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$	$2p=10$	$2p=12$	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$
45	0,04	0,025	–	–	–	–	–	–	–	–
	0,06	0,04	–	–	–	–	–	–	–	–
50	0,09	0,06	–	–	–	–	–	–	–	–
	0,12	0,09	–	–	–	–	–	–	–	–
56	0,18	0,12	–	–	–	–	0,09	0,06	–	–
	0,25	0,18	–	–	–	–	0,12	0,09	–	–
63	0,37	0,25	0,18	–	–	–	0,18	0,12	0,06	–
	0,55	0,37	0,25	–	–	–	0,25	0,18	0,09	–
71	0,75	0,55	0,37	–	–	–	0,37	0,25	0,18	0,09
	1,1	0,75	0,55	0,25	–	–	0,55	0,37	0,25	0,12
80	1,5	1,1	0,75	0,37	–	–	0,75	0,55	0,37	0,18
	2,2	1,5	1,1	0,55	–	–	1,1	0,75	0,55	0,25
90S	–	–	–	–	–	–	1,5	1,1	0,75	0,37
90L	3,0	2,2	1,5	0,75; 1,1	–	–	2,2	1,5	1,1	0,55
100S	4,0	3,0	–	–	–	–	–	–	–	–
100L	5,5	4,0	2,2	1,5	–	–	3	2,2; 3	1,5	0,75; 1,1
112M	7,5	5,5	3; 4	2,2; 3	–	–	4	4	2,2	1,5
132S	–	7,5	5,5	4,0	–	–	5,5; 7,5	5,5	3	2,2
132M	11	11	7,5	5,5	–	–	–	7,5	4; 5,5	3
160S	15	15	11	7,5	–	–	–	–	–	–
160M	18,5	18,5	15	11	–	–	11;15	11	7,5	4; 5,5
160L	–	–	–	–	–	–	18,5	15	11	7,5
180S	22	22	–	–			–	–	–	–
180M	30	30	18,5	15	–	–	22	18,5	–	–
180L	–	–	–	–	–	–	–	22	15	11
200M	37	37	22	18; 5	–	–	–	–	–	–
200L	45	45	30	22	–	–	30; 37	30	18,5;22	15
225S	–	–	–	–	–	–	–	37	–	18,5
225M	55	55	37	30	–	–	45	45	30	22
250S	75	75	45	37	22	–	–	–	–	–
250M	90	90	55	45	30	–	55	55	37	30
280S	110	110	75	55	37	–	75	75	45	37
280M	132	132	90	75	45	–	90	90	55	45
315S	160	160	110	90	55	45	110	110	75	55
315M	200	200	132	110	75	55	132	132	90	75
355S	250	250	160	132	90	75	–	–	–	–
355M	315	315	200	160	110	90	–	–	–	–

Таблица 1.12

Условное обозначение установочных размеров	Вариант P										Вариант C							
	Номинальная мощность, кВт						Размеры конца вала, мм				Номинальная мощность, кВт				Размеры конца вала, мм			
							d_1 (D)		l_1 (E)						d_1 (D)		l_1 (E)	
	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$	$2p=10$	$2p=12$	$2p=2$	$2p\geqslant4$	$2p=2$	$2p\geqslant4$	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$	$2p=2$	$2p\geqslant4$	$2p=2$	$2p\geqslant4$
200M	55	45	30	22	–	–	55	60	110	140	45	37	22	18,5	60	60	140	140
200L	75	55	37	30	–	–	55	60	110	140	55	45	30	22	60	60	140	140
225M	90	75	45	37	–	–	55	60	110	140	75	55	37	30	60	65	140	140
250S	110	90	55	45	–	–	65	75	140	140	90	75	45	37	65	75	140	140
250M	132	110	75	55	–	–	65	75	140	140	110	90	55	45	65	75	140	140
280S	160	132	90	75	–	–	70	80	140	170	–	110	75	55	65	80	140	170
280M	200	160	110	90	–	–	70	80	140	170	132	132	90	75	65	80	140	170
315S	–	200	132	110	75	55	75	90	140	170	160	160	110	90	70	90	140	170
315M	250	250	160	132	90	75	75	90	140	170	200	200	132	110	70	90	140	170
355S	315	315	200	160	110	90	85	100	170	210	250*	250*	160*	132*	70	90	140	170
355M	400	400	250	200	132	110	85	100	170	210	315*	315*	200*	160*	70	90	140	170

*Указанные мощности в стандарте CENELEC отсутствуют.

Примечание. Обозначения размеров конца вала – по рис. 1.1.

полнения, что в большинстве случаев достигается только изменением размеров лап; вся активная часть машины остается той же.

Для исполнения IP23 увязка рядов мощностей и установочных размеров приведена в табл. 1.12.

1.5. НОМИНАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, ЧАСТОТЫ И ЧИСЛА ПОЛЮСОВ

В серии принято, что АД с высотами оси вращения до 63 мм включительно по варианту Р и до 71 мм включительно по варианту С должны выполняться на напряжение 380 В. Двигатели с большими высотами оси вращения должны изготовляться на номинальные напряжения 380 и 660 В.

В СССР АД мощностью от 0,025 до 0,37 кВт должны выполняться на напряжение 220, 380 В; от 0,55 до 11 кВт – на 220, 380, 660 В при соединении фаз в звезду или треугольник с тремя выводными концами. По требованию заказчика АД могут изготовляться с шестью выводными концами. Двигатели мощностью свыше 11 кВт изготовляются на напряжение 380/660 В с шестью выводными концами. Все АД могут быть изготовлены на другие напряжения, предусмотренные в СТ СЭВ 4744-84.

Основное исполнение АД предусматривается на частоту 50 Гц. Для поставок на экспорт возможно исполнение АД на 60 Гц.

Двигатели всех высот оси вращения изготовляются с $2p = 2$ и 4, начиная с высоты 63 мм и выше – также с $2p = 6$, а с высоты 71 мм и выше – с $2p = 8$. По варианту Р предусматривается производство 10-полюсных АД при высоте оси вращения 225 мм и выше, а также 12-полюсных АД, начиная с высоты оси вращения 315 мм и выше. В варианте С по сравнению с действующими стандартами CENELEC добавлено несколько типов 6- и 8-полюсных АД.

1.6. УСЛОВИЯ РАБОТЫ

Условия работы АД определяются условиями окружающей среды, питания и нагрузки.

Условия окружающей среды характеризуются температурой окружающего воздуха, его влажностью и давлением (или высотой над уровнем моря), запыленностью, присутствием химически активных веществ, разных видов физических излучений, а также механическими воздействиями на АД: вибрациями, ударами.

Нормальные условия окружающей среды (температура воздуха и высота над уровнем моря) определены Публикацией МЭК 34-1 и СТ СЭВ 460-77. За нормальную высоту над уровнем моря принята высота не более 1000 м, а максимальная температура окружающего воздуха

+40 °С. Однако допускается, чтобы АД общего назначения работали на высоте до 4000 м над уровнем моря с полной нагрузкой, если ухудшение условий охлаждения из-за пониженного давления компенсируются более низкой на этих высотах температурой воздуха. В Публикации МЭК принята минимальная температура окружающего воздуха –15 °С.

Запыленность воздуха принята для исполнения IP54 (44) не более 10 мг/м^3, для IP23 – не более 2 мг/м^3.

Двигатели серии должны быть предназначены для эксплуатации в климатических условиях N2 – N4. Согласно СТ СЭВ 458-77 N обозначает макроклиматический район с умеренным климатом, в котором максимальная температура ниже +40 °С, а минимальная температура выше –45 °С. Цифры 2, 3 и 4 относятся к категориям размещения изделий. По стандарту СЭВ 460-77 изделия, обозначенные этими цифрами, пригодны для эксплуатации в следующих условиях:

2 – под навесом или в помещениях (объемах), где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе и имеется сравнительно свободный доступ наружного воздуха (отсутствие прямого воздействия солнечного излучения и атмосферных осадков);

3 – в закрытых помещениях (объемах) с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий или с длительными перерывами в регулировании, где колебания температуры и влажности воздуха и воздействие песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе (отсутствие воздействия атмосферных осадков, прямого солнечного излучения; существенное уменьшение ветра; существенное уменьшение или отсутствие воздействия рассеянного солнечного излучения и конденсации влаги);

4 – в помещениях (объемах) с искусственно регулируемыми климатическими условиями (отсутствие воздействия прямого солнечного излучения, атмосферных осадков, ветра).

Некоторые страны СЭВ не присоединились к СТ СЭВ 460-77 и будут пользоваться другими значениями минимальной температуры согласно своим национальным стандартам.

Под условиями питания АД понимаются допускаемые отклонения напряжения и частоты питающей сети от номинальных значений, допускаемое отклонение кривой питающего напряжения от синусоиды и допускаемая асимметрия трехфазной системы напряжений.

По действующим публикациям МЭК 34-1 и СТ СЭВ 1346-78 АД должны обеспечивать номинальную мощность при колебании напряжения в пределах от 95 до 105% номинального значения, при этом допускается увеличение превышения температуры обмотки на 10 °С.

При одновременном отклонении напряжения и частоты от номинальных значений АД должен сохранять номинальную мощность, если сумма

абсолютных значений этих отклонений не превосходит 5%. В разрабатываемых новых рекомендациях МЭК предусматривается определение двух областей допускаемых одновременных изменений напряжения и частоты сети:

меньшей области, в которой АД должен быть способным работать с полной нагрузкой без ограничения времени, причем в этих условиях можно ожидать увеличения температуры на 10 °С;

большей области, в которой АД должен быть в состоянии выполнять свою функцию, но в которой время работы должно быть ограничено.

В Публикации МЭК 34-1 и СТ СЭВ 1346-78 требуется, чтобы АД работали с номинальной мощностью при практически синусоидальном напряжении и практически симметричной трехфазной системе напряжений сети. Практически синусоидальным называют напряжение, мгновенное значение которого при номинальной нагрузке АД отличается от соответствующего мгновенного значения первой гармонической не более чем на 5% по амплитуде. В практически симметричной системе составляющая напряжения обратной последовательности не превышает длительно 1% и кратковременно 1,5% напряжения прямой последовательности, а нулевая составляющая – 1% прямой последовательности. По согласованию с заказчиком допускается вместо составляющей обратной последовательности напряжений измерять составляющую обратной последовательности токов; последняя не должна превышать 2,5% составляющей прямой последовательности токов.

Совпадение максимального допустимого отклонения формы кривой напряжения и максимальной допустимой асимметрии трехфазной системы не должно оказывать вредного влияния на нагрев АД; рекомендуется, чтобы возникшее в этих условиях увеличение температуры не было больше 10 °С.

В рамках МЭК разрабатывается новый документ о влиянии асимметрии трехфазной системы напряжений на работу АД, который предусматривается включить в Публикацию 34-1 в качестве приложения. Вместо составляющей обратной последовательности для определения степени асимметрии системы предлагается максимальное процентное отклонение одного из напряжений от среднего значения напряжений фаз. В зависимости от асимметрии системы напряжений рекомендуется определенное уменьшение нагрузки АД.

ГОСТ 183-74 допускает работу АД при несинусоидальности 10% и несимметрии 2%.

Номинальный режим работы АД серии АИ определяется режимом S1, в котором машина согласно Публикации МЭК 34-1 работает с номинальной мощностью достаточно длительно при достижении установившейся температуры.

Кроме S1 АД должны допускать работу и в режимах S2 – S8 (ГОСТ 183-74):

S2 – кратковременном с длительностью периода неизменной номинальной нагрузки 10, 30, 60 и 90 мин;

S3 – повторно-кратковременном с ПВ=15, 25, 40 и 60%; продолжительность одного цикла принимается 10 мин;

S4 – повторно-кратковременном с частыми пусками с ПВ=15, 25, 40 и 60%; числом включений в час 30, 60, 120 и 240 при коэффициенте инерции FI = 1,2; 1,6; 2; 2,5; 4; 6,3 и 10;

S5 – повторно-кратковременном с частыми пусками и электрическим торможением с ПВ = 15, 25, 40 и 60%; числом включений в час 30, 60, 120 и 240 при коэффициенте инерции FI=1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0;

S6 – перемежающемся с продолжительностью нагрузки 15, 25, 40 и 60%; продолжительность одного цикла 10 мин;

S7 – перемежающемся с частыми реверсами при электрическом торможении с числом реверсов в час 30, 60, 120 и 240 при коэффициенте инерции FI = 1,2; 1,6; 2,0; 2,5 и 4,0;

S8 – перемежающемся с двумя или более частотами вращения с числом циклов в час 30, 60, 120 и 240 при коэффициенте инерции FI = = 1,2; 1,6; 2; 2,5 и 4.

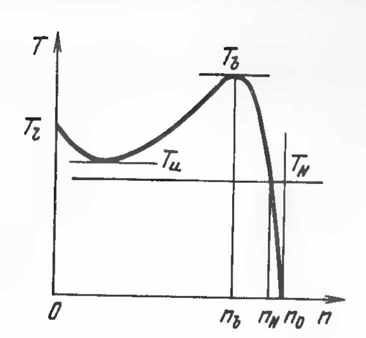
Коэффициент инерции FI – отношение момента инерции нагрузки к моменту инерции ротора двигателя.

Во время работы АД возможны некоторые перегрузки, оказывающие вредное влияние на срок службы АД. Для ограничения этих перегрузок предусматривается соответствующая защита АД. Так как слишком быстрое отключение АД при небольшой перегрузке является обычно нежелательным, то согласно вновь разрабатываемым рекомендациям МЭК АД должен до срабатывания защиты выдерживать перегрузку током, превышающим на 50% номинальный, в течение не менее 2 мин.

Кроме того, трехфазные АД должны выдерживать без остановки или резкого изменения частоты вращения вращающий момент, превышающий номинальный на 60%, в течение не менее 15 с при номинальных напряжении и частоте. Если начальный пусковой ток АД меньше 4-, 5-кратного значения номинального тока, допускаемая перегрузка по моменту снижается до 50%.

1.7. ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Пусковые характеристики двигателей серии АИ должны соответствовать Публикации МЭК 34-12, рекомендации которой относятся к АД общего назначения низкого напряжения (до 660 В), предназначенным для прямого пуска (исполнение N), а также для пуска с переключением обмотки со звезды на треугольник (исполнение NY). Стандарт устанавливает для квазистационарного режима пуска (с пренебрежением переходных процессов) три значения вращающего момента (рис. 1.4): T_l – начальный пусковой момент, T_u – минимальный момент и T_b –



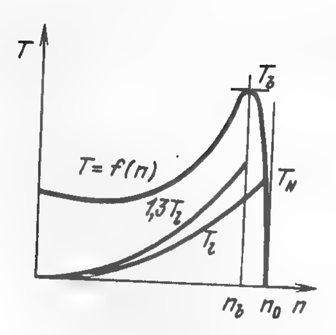


Рис. 1.4. Механическая характеристика двигателей

Рис. 1.5. Требования по соотношению между механической характеристикой и моментом сопротивления нагрузки

критический (максимальный) момент. Значения этих моментов отнесены к номинальному моменту. Кроме того, стандарт устанавливает отношение S_L полной начальной пусковой мощности, кВ·А, к номинальной мощности, кВт:

$$S_L = \frac{I_L}{I_N} \frac{1}{\cos\varphi_N \eta_N}, \qquad (1.7)$$

$\cos\varphi_N$ и η_N – номинальные значения коэффициента мощности и КПД.

Отношение пусковой мощности более удобно, чем отношение начального пускового тока, потому что база отнесения P_N вполне определенная, а база I_N для АД данной мощности может принимать различные значения в зависимости от $\cos\varphi_N$ и η_N.

В серии АИ основным принято исполнение N, для которого в табл. 1.13 приведены значения вращающих моментов, а в табл. 1.14 – значения пусковой мощности по Публикации МЭК 34-12. Значения, приведенные в таблицах, не имеют допусков: моменты минимальны, пусковая мощность максимальна.

Кроме требований, относящихся к трем точкам механической характеристики, в Публикации МЭК определены рекомендации к этой характеристике в целом. В каждой точке характеристики (рис. 1.5) от нулевой частоты вращения до критической n_b значение момента, развиваемого АД, должно быть не менее $1{,}3T_l$, где T_l – статический момент нагрузки, изменяющийся по квадратичной зависимости, что характерно для привода вентиляторов или центробежных насосов:

$$T_l = T_N(n/n_N)^2. \qquad (1.8)$$

Таблица 1.13

Номинальная мощность, кВт	Отношения моментов при числе полюсов											
	$2p = 2$			$2p = 4$			$2p = 6$			$2p = 8$		
	T_l	T_u	T_b	T_l	T_u	T_b	T_l	T_u	T_b	T_l	T_u	T_b
Свыше 0,4 до 0,63	1,9	1,3	2	2	1,4	2	1,7	1,2	1,7	1,5	1,1	1,6
Свше 0,63 до 1,0	1,8	1,2	2	1,9	1,3	2	1,7	1,2	1,8	1,5	1,1	1,7
Свыше 1,0 до 1,6	1,8	1,2	2	1,9	1,3	3	1,6	1,1	1,9	1,4	1	1,8
Свыше 1,6 до 2,5	1,7	1,1	2	1,8	1,2	2	1,6	1,1	1,9	1,4	1	1,8
Свыше 2,5 до 4,0	1,6	1,1	2	1,7	1,2	2	1,5	1,1	1,9	1,3	1	1,8
Свыше 4 до 6,3	1,5	1	2	1,6	1,1	2	1,5	1,1	1,9	1,3	1	1,8
Свыше 6,3 до 10	1,5	1	2	1,6	1,1	2	1,5	1,1	1,8	1,3	1	1,7
Свыше 10 до 16	1,4	1	2	1,5	1,1	2	1,4	1	1,8	1,2	0,9	1,7
Свыше 16 до 25	1,3	0,9	1,9	1,4	1	1,9	1,4	1	1,8	1,2	0,9	1,7
Свыше 25 до 40	1,2	0,9	1,9	1,3	1	1,9	1,3	1	1,8	1,2	0,9	1,7
Свыше 40 до 63	1,1	0,8	1,8	1,2	0,9	1,8	1,2	0,9	1,7	1,1	0,8	1,7
Свыше 63 до 100	1	0,7	1,8	1,1	0,8	1,8	1,1	0,8	1,7	1	0,7	1,6
Свыше 100 до 160	0,9	0,7	1,7	1	0,8	1,7	1,0	0,8	1,7	0,9	0,7	1,6
Свыше 160 до 250	0,8	0,6	1,7	0,9	0,7	1,7	0,9	0,7	1,6	0,9	0,7	1,6
Свыше 250 до 400	0,75	0,6	1,6	0,75	0,6	1,6	0,75	0,6	1,6	0,75	0,6	1,6

Таблица 1.14

Номинальная мощность, кВт	S_L, кВ·А/кВт
Свыше 0,4 до 6,3	13
Свыше 6,3 до 25	12
Свыше 25 до 630	11

При разработке Публикации МЭК большое внимание было обращено на определение допускаемых условий пуска АД общего назначения. Обмотка статора и клетка ротора нагреваются тем больше, чем больше длительность пуска. Имеются четыре главных фактора, которые определяют допускаемую длительность пуска:

1) нагревостойкость системы изоляции обмотки статора;
2) срок службы системы изоляции обмотки статора;
3) механические напряжения в клетке ротора, вызванные тепловыми расширениями;
4) характеристики встроенной температурной защиты АД, если она установлена в АД.

Первое ограничение вызвано тем, что некоторые изоляционные материалы (главным образом лаки) при определенной критической температуре переходят в пластическое состояние, теряя свои изоляционные свойства. Поэтому количество теплоты, возникающей в обмотке статора во время пуска, должно быть ограничено в такой степени, чтобы тем-

пература обмотки была ниже критической на значение, необходимое для обеспечения надежности.

Второе ограничение возникает оттого, что при длительном нагреве (даже ниже критической температуры) происходит ускоренное старение изоляционной системы. Это возникает при часто повторяющихся пусках, которые повышают среднюю температуру обмотки.

Третье ограничение имеет значение для АД больших мощностей, у которых клетка сварная с высокими стержнями. Вытеснение тока в этих стержнях вызывает большее превышение температуры верхнего слоя по сравнению с нижним, что является причиной возникновения механических напряжений и может привести к разрыву стержней, короткозамыкающих колец или их соединений.

Четвертое ограничение связано с применением защиты со встроенными термическими датчиками. В этом случае превышение температуры обмотки статора во время пуска не должен достигать температуры, при которой срабатывает защита и выключается АД.

На основе приведенных предпосылок МЭК определил допустимые условия пуска АД.

Для АД в исполнении N, предназначенных для продолжительного режима работы, допускаются два последовательных пуска (с остановкой между пусками) с холодного состояния или один пуск с нагретого состояния после длительной работы с номинальной нагрузкой. Очередной пуск АД допускается только в случае, если температура АД перед пуском не превышает установившейся температуры при номинальной нагрузке. Значения предельно допустимого внешнего момента инерции при пуске, приведенные в табл. 1.15, определены по формуле

$$J = 0{,}04 P_N^{0{,}9} p. \quad (1.9)$$

Эти значения соответствуют статическому моменту нагрузки, изменяющемуся в процессе пуска по закону (1.8).

По испытаниям, проведенным в Институте электротехники (ПНР), превышение температуры обмотки статора после одного пуска с нагретого состояния при предельном моменте инерции и вращающих моментах по табл. 1.13 увеличивается на 6–10 °С. Такой скачок температуры по приведенным четырем критериям вполне допустим.

Продолжительность пуска 4-полюсных АД мощностью менее 100 кВт при вращающих моментах, приведенных в табл. 1.13, составляет 3–4 с.

Для обеспечения более надежной защиты для АД серии АИ в СССР установлены предельные расчетные скорости нарастания температуры обмотки статора при заторможенном роторе, равные:

10 °С/с для АД с $2p = 2$,

8 °С/с для АД с $2p > 2$.

Скорость нарастания температуры обмотки, °С/с, определяется по формуле

Таблица 1.15

Номинальная мощность, кВт	Предельно допустимый момент инерции нагрузки, кг · м², при числе полюсов			
	$2p = 2$	$2p = 4$	$2p = 6$	$2p = 8$
0,4	0,018	0,099	0,273	0,561
0,63	0,026	0,149	0,411	0,845
1,0	0,040	0,226	0,624	1,28
1,6	0,061	0,345	0,952	1,95
2,5	0,091	0,516	1,42	2,92
4	0,139	0,788	2,17	4,46
6,3	0,210	1,19	3,27	6,71
10	0,318	1,80	4,95	10,2
16	0,485	2,74	7,56	15,2
25	0,725	4,10	11,3	23,2
40	1,11	6,26	17,2	35,4
63	1,67	9,42	26,0	53,3
100	2,52	14,3	39,3	80,8
160	3,85	21,8	60,1	123
250	5,76	32,6	89,7	184
400	8,79	49,7	137	281

$$Q_t = (k_i J_i)^2/200, \quad (1.10)$$

где k_i – отношение начального пускового тока к номинальному; J_i – плотность тока в обмотке статора в номинальном режиме, А/мм².

1.8. УРОВЕНЬ ШУМА И ВИБРАЦИИ

Требования к уровню шума АД все время ужесточаются. Это связано с возросшими требованиями к защите окружающей среды. Кроме того, установлено, что шум оказывает вредное влияние на производительность труда.

В 1972 г. выпущена Публикация МЭК 34-9, которая определяет допустимые уровни звуковой мощности и звукового давления для электрических машин общего назначения. Стандарт СЭВ 1348-78 устанавливает допустимый шум АД на этом же уровне. В настоящее время в МЭК ведутся работы по подготовке новой Публикации, в которой рекомендации по уровню шума будут более жесткими, чем в Публикации 34-9. Многие зарубежные фирмы в последнее время значительно снизили уровень шума АД общего назначения.

2–6983

Таблица 1.16

Номинальная мощность, кВт	Допустимые уровни шума, дБ, при числе полюсов							
	$2p = 2$		$2p = 4$		$2p = 6$		$2p = 8$	
	L_{pA}	L_{dA}	L_{pA}	L_{dA}	L_{pA}	L_{dA}	L_{pA}	L_{dA}
Свыше 0,06 до 0,55	70	62	65	57	62	54	60	52
Свыше 0,55 до 1,1	74	65	70	61	69	60	66	57
Свыше 1,1 до 2,2	79	69	73	63	70	60	69	59
Свыше 2,2 до 5,5	83	73	77	67	74	64	72	62
Свыше 5,5 до 11	92	82	81	71	78	68	75	65
Свыше 11 до 22	96	85	86	75	83	72	79	68
Свыше 22 до 37	98	87	92	81	90	79	86	75
Свыше 37 до 55	100	89	94	83	92	81	87	76
Свыше 55 до 110	102	90	99	87	96	85	91	79
Свыше 110 до 220	105	92	101	88	99	86	95	82
Свыше 220 до 400	107	93	104	90	101	87	97	83

Учитывая эти тенденции, специалисты Интерэлектро разработали требования по уровню шума для унифицированной серии, приведенные в табл. 1.16, где L_{dA} обозначает уровень звукового давления, дБ (по шкале A), измеренный на расстоянии 1 м от поверхности АД; L_{pA} – уровень звуковой мощности, дБ (по шкале A). Значения, приведенные в табл. 1.16, получены при холостом ходе АД.

Согласно рекомендациям ISO 2373-74 в качестве нормируемого параметра интенсивности вибрации электрических машин применяется наибольшее среднеквадратичное значение виброскорости v, измеренное в определенных местах АД:

$$v = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t)\,dt}, \qquad (1.11)$$

где $v(t)$ – мгновенное значение виброскорости, мм/с; T – период вибраций, с.

Стандарты устанавливают три категории интенсивности вибрации: нормальную N, с повышенными требованиями R и специальную S. Для АД серии АИ с высотой оси вращения свыше 56 мм принята нормальная категория N интенсивности вибрации. Для небольших АД (с высотой оси вращения 45 и 50 мм), для которых стандартами не определена интенсивность вибрации, согласовано дополнительное ее значение.

Максимально допустимые виброскорости АД категории N

Высота оси вращения, мм	45–50	56–132	160–225	250–355
Виброскорость, мм/с	1,1	1,8	2,8	4,5

1.9. СРОК СЛУЖБЫ И ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

Для АД серии АИ при соединении их с механизмом эластичной муфтой установлено, что расчетный срок службы должен быть не менее 20 000 ч при вероятности безотказной работы не менее 0,9.

Как показывают проведенные испытания и опыт эксплуатации, АД чаще всего выходят из строя из-за повреждений изоляции обмоток статора, особенно эмали проводов. Наименее надежными механическими элементами являются подшипники.

Для достижения необходимого срока службы АД предусматривается стандартами ряд требований, которые должны быть проверены при периодических или приемо-сдаточных испытаниях.

Самым основным требованием с точки зрения срока службы АД является допускаемое превышение температуры обмоток статора в зависимости от класса нагревостойкости применяемой системы изоляции. При испытании АД рассматриваемого диапазона мощностей для определения превышения температуры обмоток чаще всего используется метод сопротивления. Для этого метода предельно допускаемые превышения температуры обмоток статора установлены 80 °С при изоляции класса В и 100 °С при изоляции класса F. Испытания на нагревание должны быть проведены в нормальных условиях окружающей среды и при точно определенных стандартами условиях испытания, нагрузки и проведения измерений. Если измерение сопротивления обмоток выполняется методом суперпозиции без отключения АД от сети, то допускается на 5 °С большее превышение температуры, чем для метода сопротивления.

Для увеличения надежности работы АД ряд стран-участниц Интерэлектро, в том числе СССР, решили применить во всей серии изоляционную систему класса нагревостойкости F при превышениях температуры обмотки и сердечника, соответствующих классу нагревостойкости В.

Так как срок службы изоляционной системы быстро уменьшается (приблизительно экспоненциально) с увеличением температуры, стандарты обращают внимание потребителей на правильную эксплуатацию АД, допуская тепловую перегрузку изоляционной системы только в необходимых случаях. Вместе с тем предъявляются требования к АД, ограничивающие увеличение превышения температуры в ненормальных условиях работы.

Как было показано выше, стандарты ограничивают время перегрузки по току, время пуска, отклонение напряжения и частоты от номинальных значений, а также значение несинусоидальности напряжения и несимметрии трехфазной системы напряжений. Все эти ненормальные условия работы вредно влияют на срок службы АД, и стандарты четко обращают внимание потребителей на эти обстоятельства.

В начальном периоде эксплуатации АД часто встречается пробой витковой изоляции, изоляции от корпуса или междуфазной изоляции.

Для предупреждения преждевременного выхода АД из строя по причине слабых мест изоляционной системы обмотки всех АД подвергаются испытанию на повышенное напряжение.

Стандарт СЭВ 1346-78 предусматривает, чтобы изоляция токоведущих частей АД выдержала в течение 1 мин без пробоя относительно корпуса и между отдельными фазами обмотки испытательное напряжение промышленной частоты, равное 1000 В плюс двукратное номинальное напряжение, но не менее 1500 В.

При массовом и крупносерийном производстве допускается уменьшение времени испытания изоляции обмотки статора АД при приемо-сдаточных испытаниях. Это время обычно задается производственным ритмом.

Испытание межвитковой изоляции является сложным, и поэтому в Публикации МЭК нет требований по проведению этих испытаний. В СТ СЭВ 1346-78 требуется, чтобы межвитковая изоляция выдержала в течение 3 мин испытание напряжением на выводах АД, равным 1,3 номинального. Допускается также применение других методов, обеспечивающих выявление дефектов межвитковой изоляции.

Механическую прочность ротора проверяют в соответствии со СТ СЭВ 1346-78 испытанием машины в течение 2 мин при повышенной частоте вращения, равной 1,2 номинальной.

В СССР разработана методика ускоренных испытаний АД на срок службы.

1.10 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Энергетические показатели (КПД, коэффициент мощности $\cos\varphi$) были установлены в процессе разработки АД серии АИ исходя из условий минимальных суммарных затрат в производстве и эксплуатации АД. В основу их определения легли оптимизационные расчеты, проводимые с помощью ЭВМ, методика которых разработана в рамках НИР, проведенных специалистами Интерэлектро, и изложена в гл. 2.

С учетом того, что в различных странах-участницах Интерэлектро экономические условия (стоимость электроэнергии, годовая наработка и т.д.) несколько различаются, для обеспечения конкурентоспособности АД серии АИ на мировом рынке для исполнения IP54 были предварительно согласованы рекомендуемые значения КПД (табл. 1.17), которые в дальнейшем, при проектировании АД, были уточнены в основном в сторону увеличения.

В СССР при расчете затрат на потери электроэнергии были приняты следующие значения годовой наработки, которые получены по данным эксплуатации двигателей:

Высота оси вращения, мм	Годовая наработка, ч
45–100	1250
112, 132	1700
160–200	2100
225–280	2600
315, 355	3200

Таблица 1.17

Номинальная мощность, кВт	Коэффициент полезного действия, %, при числе полюсов					
	$2p = 2$	$2p = 4$	$2p = 6$	$2p = 8$	$2p = 10$	$2p = 12$
0,025	–	42	–	–	–	–
0,04	45	46	–	–	–	–
0,06	50	50	–	–	–	–
0,09	60	55	–	–	–	–
0,12	63	63	–	–	–	–
0,18	66	64	56	–	–	–
0,25	68	67	59	56	–	–
0,37	70	68	65	62	–	–
0,55	73	71	68	64	–	–
0,75	77	72	69	68	–	–
1,1	78	75	74	70	–	–
1,5	81	77	75	74	–	–
2,2	83	80	80	76,5	–	–
3	84,5	82	81	79	–	–
4	86,5	84	82	82	–	–
5,5	87	85,5	85	83	–	–
7,5	87,5	87,5	85,5	86	–	–
11	88	88	86	87	–	–
15	88	89	87,5	87,5	–	–
18,5	88,5	90	88	88	–	–
22	89	90,5	90	88,5	–	–
30	90	91	90,5	90	–	–
37	90,5	91,5	91	90,5	91	–
45	91	92	91,5	91	91,5	90,5
55	91	92,5	91,5	92	92	91
75	91,5	93	92	92,5	92	91,5
90	92	93,0	92,5	93	92,5	92
110	92	93	93	93	93	–
132	92	93	93,5	93,5	–	–
160	92	93,5	93,5	94	–	–
200	92,5	94	94	–	–	–
250	92,5	94,5	–	–	–	–
315	93	94,5	–	–	–	–

1.11. ОБОЗНАЧЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

Правильное обозначение модификаций и исполнений серии важно для автоматической системы управления производством (АСУП), а также для создания системы ведения чертежного хозяйства как части общей системы автоматизированного проектирования (САПР). Серия АИ содержит значительное количество модификаций и исполнений, поэтому задача выбора обозначений является весьма сложной. Для обозначения серии АИ принята структура, в которой можно выделить три вида обозначения: базовое, основное, полное.

Базовое обозначение – это сочетание элементов символов, определяющих серию АД, его мощность, частоту вращения (обозначение серии, вариант увязки мощности к установочным размерам, высота оси вращения, установочный размер по длине станины и длина магнитопровода статора, число полюсов).

Например: АИР100М4 (серия АИ, увязка по варианту Р, высота оси вращения 100, длина корпуса по установочным размерам М, число полюсов 4).

Основное обозначение – это сочетание базового исполнения АД с видом защиты и охлаждения, с электрической и конструктивной модификацией, со специализированным исполнением и исполнением по условиям окружающей среды.

Например: АИРБС100М4НПТ2 (АИР100М4 – базовое обозначение, Б – закрытое исполнение с естественным охлаждением без обдува, С – с повышенным скольжением, Н – малошумные, П – с повышенной точностью установочных размеров, Т – для тропического климата, 2 – категория размещения).

Полное обозначение – сочетание основного обозначения с дополнительными электрическими и конструктивными характеристиками.

Например: АИРБС100М4НПТ2 220/380 В, 60 IM2181, К3-11-3, F 100, (АИРБС100М4НПТ2 – основное обозначение, 220/380 В – напряжение, 60 – частота сети, IM2181 – исполнение по способу монтажа и по концу вала, К3-11-3 – исполнение выводного устройства и количество штуцеров, F100 – исполнение фланцевого щита).

Буквы могут быть как русского, так и латинского алфавита. Более подробное обозначение двигателей приведено в табл. 1.18.

Таблица 1.18

Наименование		Обозначение	
общее	конкретное	русское	латинское
Номер серии	1-я единая серия АД	Не указывается	Не указывается
	2-я единая серия АД	2	2
Серия	Единая серия АД	АИ	А1
Вариант при-	Вариант Р	Р	Р

Таблица 1.18 (продолжение)

Наименование		Обозначение	
общее	конкретное	русское	латинское
вязки мощности к установочным размерам	Вариант С	С	С
Исполнение по виду защиты и охлаждения	Закрытое с внешним обдувом корпуса со встроенным вентилятором	Не указывается	Не указывается
	Закрытое с естественным охлаждением	Б	B
	Защищенное	Н	N
	Открытое	Л	L
	Встраиваемое	В	V
	Закрытое продуваемое	П	P
	С пристроенным вентилятором от отдельного двигателя	Ф	F
Электрическая модификация	С повышенным скольжением	С	C
	С повышенным пусковым моментом	Р	R
	С регулируемой частотой вращения	Х	X
	С фазным ротором	К	K
	Однофазные с пусковым конденсатором	У	Y
	Однофазные с рабочим конденсатором	Е	E
	Однофазные с пусковым и рабочим конденсатором	УЕ	YE
	Для кратковременного режима работы	$К_р$	K_R
Высота оси вращения (габарит)	–	45–355	45–355
Установочный размер по длине станины и сердечника статора	Первая длина сердечника	–	A
	Вторая длина сердечника	–	B
	Третья длина сердечника	–	C
	Первая длина станины	–	S
	Вторая длина станины	–	M
	Третья длина станины	–	L
	Первая длина станины с сердечником первой длины	–	SA
	Первая длина станины с сердечником второй длины	–	SB
	Третья длина станины с сердечником первой длины	–	LA
	Третья длина станины с сердечником второй длины	–	LB
Число полюсов	2		2
	4		4
	6		6
	8		8
	10		10
	12		12
	4/2		4/2
	6/4		6/4
	8/4		8/4

Таблица 1.18 (продолжение)

Наименование		Обозначение	
общее	конкретное	русское	латинское
Число полюсов	8/6		8/6
	6/4/2		6/4/2
	8/6/4		8/6/4
	8/4/2		8/4/2
Конструктивная модификация	С температурной защитой	Б	B
	Малошумная	Н	N
	С повышенной точностью установочных размеров	П	P
	С высокой точностью установочных размеров	П2	P2
	Со встроенным электромагнитным тормозом	Е	E
Исполнение по условиям окружающей среды	Для умеренного климата	У2, У3, У5	N_2, N_3, N_5
	Для холодного и умеренного климата	ХЛ1–ХЛ5	F_1–F_5
		УХЛ1–УХЛ5	NF_1–NF_5
	Для тропического климата	Т1 – Т5	T1 – T5
		ТВ1 – ТВ5	TH1 – TH5
		ТС1 – ТС5	TA1 – TA5
Напряжение сети, В	220/380		220/380
	230/400		230/400
	240/415		240/415
	380/660		380/660
	220		220
	230		230
	380		380
	400		400
	415		415
	440		440
	550		550
	660		660
	115/230		115/230
	220/440		220/440
	230/460		230/460
Частота сети, Гц	50		50
	60		60
	400		400
Исполнение по способу монтажа, исполнение по концу вала	–	–	IM1081
	–	–	IM1082
	–	–	IM2081
	–	–	IM2081
	–	–	IM2082
	–	–	IM3041
	–	–	IM3042
	–	–	IM2181
	–	–	IM2182
	–	–	IM3641
	–	–	IM3642
			...

Таблица 1.18 (окончание)

Наименование		Обозначение	
общее	конкретное	русское	латинское
Исполнение малого фланцевого щита	Диаметр расположения отверстий во фланце, мм:		
	85	–	85
	100	–	100
	115	–	115
	130	–	130
	165	–	165

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Сложность и высокая стоимость разработки новых серий АД требует таких подходов к проектированию, применение которых привело бы к оптимальным инженерным исследованиям в достаточно короткие сроки. Одним из путей достижения этой цели является создание достаточно полной математической модели проектируемого АД и проведение большого объема поверочных и поисковых расчетов. Такое направление, часто называемое вычислительным экспериментом, базируется на системах расчетного проектирования электрических машин. Эти системы, использующие современные ЭВМ, предоставляют инженеру-исследователю и проектировщику возможность получения различной информации, необходимой при проектировании. Для эффективного решения этих задач широко используется аппарат оптимального проектирования.

Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ впервые в СССР осуществлено Т.Г. Сорокером и Б.М. Каганом при разработке АД серии А2. Впоследствии методы оптимального проектирования были развиты при создании АД серий 4А и АИ.

Разработанные системы оптимального проектирования позволяют оперативно проводить оптимизационные и поверочные расчеты и информационно-поисковые операции для работы с архивами исходных данных, с результатами оптимизационных расчетов, графической документацией.

Система оптимального проектирования АД разрабатывалась в соответствии с планом научно-исследовательских работ по созданию серии АИ. При этом был решен ряд научных и прикладных проблем: выбор

структуры системы, разработка методов оптимизации и оценка их эффективности, принципы создания программной и эксплуатационной документации.

В настоящее время странами-участницами Интерэлектро планируется разработка системы автоматизированного проектирования АД (САПР АД), которая будет разработана как средство создания высокоэффективных серий АД, позволяющее повысить производительность и качество работы проектировщиков, ускорить процесс проектирования, обеспечить принятие более достоверных и обоснованных, чем ранее, проектных решений.

САПР АД должна состоять из ряда взаимодействующих подсистем: оптимального проектирования, конструкторского проектирования, технологической и др.

2.2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Математическая постановка задачи. Под оптимальным АД следует понимать такой, который удовлетворяет ограничениям, указанным в техническом задании, при минимальном (максимальном) значении критерия оптимальности (целевой функции). Для основного исполнения серии АД целевая функция – это затраты на производство и эксплуатацию. Для узкоспециализированных исполнений АД критериями оптимальности могут служить другие функции, например КПД.

Задача оптимального проектирования АД формулируется следующим образом:

минимизировать целевую функцию

$$F(\mathrm{x}),\ \mathrm{x} \in R^n \tag{2.1}$$

при выполнении линейных и (или) нелинейных условий

$$g_j(\mathrm{x}) \geqslant L_j,\ j = 1, 2, \ldots, m. \tag{2.2}$$

Функции $g_j(\mathrm{x})$, отражающие требования, предъявляемые к характеристикам АД, его конструкции, технологии изготовления, и целевая функция $F(\mathrm{x})$ предполагаются непрерывными. Константы L_j – лимитеры, назначаемые проектировщиками как ограничения на некоторые характеристики АД.

Заметим, что достаточно говорить лишь об определении минимума целевой функции, так как если требуется найти максимум, то задача сводится к определению минимума функции

$$\Phi(\mathrm{x}) = -F(\mathrm{x}).$$

Аналогично, если в условиях (2.2) возникает неравенство вида

$$g_j(\mathrm{x}) \leqslant L_j,$$

то, умножая обе части его на (–1), сводим задачу к указанной выше задаче нелинейного программирования.

Рассматриваемая задача имеет простую геометрическую интерпретацию. Уравнения $g_j(\mathrm{x}) = L_j$ описывают некоторые поверхности P_j в n-мерном пространстве R^n аргументов $x_1, x_2, \ldots, x_n$. Каждая из этих поверхностей разделяет пространство R^n на область V_j^+, в точках которой неравенство $g_j(\mathrm{x}) \geqslant L_j$ справедливо, и на область V_j^-, где это неравенство не выполняется.

Область, образованную пересечением всех областей V_j^+, будем называть допустимой и обозначать D.

Поставленную задачу можно сформулировать следующим образом: в пределах допустимой области D найти точку с наименьшим значением целевой функции $F(\mathrm{x})$, которая предполагается определенной в области D.

Методы решения задач в данной постановке принято называть методами оптимизации с явным учетом ограничений.

В ряде случаев задачу оптимального проектирования можно сформулировать как задачу с неявным учетом ограничений. Для этого, например, применяется метод штрафных функций, основная идея которого состоит в том, чтобы минимизировать новую функцию $F_0(\mathrm{x})$, равную

$$F_0(\mathrm{x}) = F(\mathrm{x}) + Q(\mathrm{x}),$$

где $Q(\mathrm{x})$ – так называемая штрафная функция, удовлетворяющая условиям

$$Q(\mathrm{x}) = 0 \text{ при } \mathrm{x} \in D;$$

$$Q(\mathrm{x}) > 0 \text{ при } \mathrm{x} \notin D.$$

При удалении от допустимой области штрафная функция должна расти достаточно быстро (что достигается соответствующим выбором штрафных коэффициентов). Формы математического представления функции $Q(\mathrm{x})$ могут быть весьма разнообразными.

Следует отметить, что приведенная выше задача – однокритериальная задача оптимального проектирования.

Практика разработки АД показывает, что качество АД оценивается, как правило, не по одному, например экономическому, критерию, а по ряду критериев. В этом случае многокритериальная задача оптимизации сводится к следующему: в n-мерном пространстве R^n найти вектор x, который минимизировал бы ряд целевых функций

$$F_1(\mathrm{x}),\ F_2(\mathrm{x}),\ \ldots,\ F_k(\mathrm{x}) \tag{2.3}$$

в области $D \in R^n$, ограниченной функциональными неравенствами

$$g_j(\mathrm{x}) \leqslant L_j \tag{2.4}$$

и координатными неравенствами

$$x_j^- \leqslant x_j \leqslant x_j^+, \; j = 1, 2, \ldots, n. \qquad (2.5)$$

Обозначим через D^* множество точек R^n, которые удовлетворяют условиям (2.4), (2.5) и условию

$$F_j(x) \leqslant F_j^*, \; j = 1, 2, \ldots, k, \qquad (2.6)$$

где F_j^* – предельно допустимое значение критерия $F_j(x)$, отличное от оптимального. Очевидно $D^* \leqslant D$.

Ясно, что наилучшие решения выгодно искать среди точек множества D^*, так как если $x \in D^*$, то значения всех критериев в этой точке заведомо приемлемы.

Трудности практической постановки и решений общей многокритериальной задачи оптимизации вызваны сложностью выбора приоритетности критериев, существенно различными характеристиками целевых функций $F_1, F_2, \ldots, F_k$, недостатком сведений о возможностях отдельных критериев и тому подобными причинами.

Наиболее распространенные подходы к постановке многокритериальных задач оптимального проектирования следующие.

Замена многих критериев единым обобщенным критерием

$$F(x) = \sum_{i=1}^{k} \beta_i F_i(x), \qquad (2.7)$$

где β_i – коэффициенты, удовлетворяющие условию $\beta_i \geqslant 0$, $\sum_{i=1}^{k} \beta_i = 1$. Обычно проектировщик в выбор каждого β_i вкладывает смысл "важности" соответствующего критерия F_i.

Основная трудность этого подхода состоит в том, что практически проектировщику сложно подобрать значения коэффициентов β_i из-за разнохарактерности целевых функций $F_i(x)$. В некоторых случаях, возможно, следует в разных частях множества D назначать различные значения β_i.

Оптимизация главного из множества критериев. При таком подходе составляют один критерий, наиболее важный с точки зрения проектировщика. Остальные критериальные функции заменяют ограничениями.

Пусть главным критерием проектировщиками выбран $F_1(x)$ и на основании дополнительных соображений выбраны ограничения для остальных целевых функций. Тогда задача оптимального проектирования может быть сформулирована следующим образом:

найти вектор x, соответствующий минимуму функции $F_1(x)$, в области, ограниченной неравенствами

$$g_j(x) \geqslant L_j, \; j = 1, 2, \ldots, m;$$

$$F_l(x) \leqslant F_l^*, \; l = 2, 3, \ldots, k.$$

Последовательная оптимизация критериев. Предполагается, что критериальные функции $F_1(x), F_2(x), \ldots, F_k(x)$ ранжированы.

Отыскивается минимальное значение $F_1(x)$ при $x \in D$; обозначим этот минимум через F_1^{min}. Затем вводится дополнительное ограничение ("уступка"), позволяющее ухудшить результат по первому критерию на некоторое допускаемое значение Δ_1. Затем производится оптимизация второго критерия $F_2(x)$ с учетом ограничения $F_1(x) \leqslant F_1^{min} + \Delta_1$.

Вводя Δ_2 и ограничение $F_2(x) \leqslant F_2^{min} + \Delta_2$, выполняют минимизацию третьего критерия и т.д. Такая постановка, широко использованная в практике оптимального проектирования АД серий 4А, АИ, формализуется следующим образом.

Даны целевые функции

$$F_1(x), F_2(x), \ldots, F_k(x), \qquad (2.8)$$

записанные в порядке планируемой минимизации;

условия

$$\left.\begin{aligned} & g_j(x) \geqslant L_j; \; j = 1, 2, \ldots, m; \\ & x_j^- \leqslant x_j \leqslant x_j^+; \; j = 1, 2, \ldots, n; \end{aligned}\right\} \qquad (2.9)$$

допуски

$$\Delta_l, \; l = 1, 2, \ldots, k-1. \qquad (2.10)$$

Требуется минимизировать последовательно целевые функции

$$F_1(x), F_2(x), \ldots, F_k(x),$$

выполняя соответственно дополнительные условия:

$F_1(x) \leqslant F_1^{min} + \Delta_1$ при минимизации $F_2(x)$,

$F_1(x) \leqslant F_1^{min} + \Delta_1$ и $F_2(x) \leqslant F_2^{min} + \Delta_2$ при минимизации $F_3(x)$,

$F_1(x) \leqslant F_1^{min} + \Delta_1, \ldots, F_{k-1}(x) \leqslant F_{k-1}^{min} + \Delta_{k-1}$ при минимизации $F_k(x)$.

Совокупность критериев оптимизации $F_i(x)$ и условий $g_j(x)$ является математической моделью множества вариантов проектируемой машины.

Методы решения задачи оптимального проектирования. Рассмотрим методы решения задачи оптимального проектирования. Принципиально задача (2.1), (2.2) может быть решена методами условного экстремума целевой функции. Вначале делается попытка найти вектор $x^* \in R^n$,

соответствующий экстремуму $F(\mathrm{x})$ без учета ограничений. Если такая точка существует и принадлежит допустимой области D, то задача решена. В противном случае приходится искать экстремальные точки $F(\mathrm{x})$ на каждой из ограничивающих поверхностей

$$g_j(\mathrm{x}) = L_j$$

и на возможных пересечениях этих поверхностей, т.е. решать большое количество задач на условный экстремум.

Нахождение условного экстремума классическими методами математического анализа, например методами множителей Лагранжа, в задачах, содержащих математическую модель АД, практически невозможно. Поэтому используют только те методы, которые требуют лишь вычислений математической модели для ограниченного количества точек или, как говорят, проведения ограниченного числа экспериментов.

Практика решения задач оптимального проектирования АД на ЭВМ показала, что следует различать методы локального и нелокального поисков.

Локальные методы. Методы локального поиска предусматривают анализ результатов каждого расчета целевой функции (эксперимента) и использования полученной информации при подготовке очередного эксперимента. Для этих методов характерно использование информации об изменении целевой функции лишь в малой окрестности значений параметров предыдущего эксперимента. Методы требуют умеренных затрат машинного времени (т.е. относительно небольшого числа вычислений математической модели), но в результате определяется в лучшем случае один локальный экстремум.

Алгоритм локального поиска в общем случае состоит из двух частей: алгоритма движения в допустимую область и непосредственно алгоритма движения к экстремуму целевой функции. Если начальная точка поиска $\mathrm{x}^0 \in D$, то первая часть отсутствует. В общем же случае приходится тем или иным способом отыскивать точку, которую можно было бы взять в качестве начальной для второй части поиска.

Допустимая область часто оказывается очень малой по сравнению с областью, задаваемой проектировщиком для поиска, и тогда выполнение первой части поиска так же сложно, как и выполнение второй его части.

К методам, позволяющим найти точку допустимой области, можно отнести метод Монте-Карло, метод регулярных разбиений и т.д. Существует ряд методов, с помощью которых движение в допустимую область выполняется с лучшим использованием информации о математической модели АД. Таким методом является, например, метод вспомогательных функций. Этот метод выполняет движение в допустимую область, минимизируя некоторую функцию $Y(\mathrm{x})$, удовлетворяющую следующим условиям:

$$Y(\mathrm{x}) = 0 \text{ при } \mathrm{x} \in D;$$

$$Y(\mathrm{x}) = 1 + \sum_i \Phi[Z(g_j(\mathrm{x}))] \text{ при } \mathrm{x} \notin D.$$

В функцию Z должны входить только нарушенные ограничения, а функция Φ должна обладать следующими свойствами:

1) $\Phi(u)$ определена и непрерывна на полуинтервале $[0, \infty)$;
2) $\Phi(0) = 0$;
3) $d\Phi(u)/du > 0$.

Метод вспомогательных функций успешно применялся при

$$\Phi(u) = u/(u+1) \text{ и } Z = (|g| - g)/2.$$

В ряде случаев минимизация $Y(\mathrm{x})$ может не привести к желаемому результату (определению допустимой точки), например если вспомогательная функция имеет локальные экстремумы, в которых ее значения отличны от нуля. В таких случаях приходится повторить движение в допустимую область из другой начальной точки либо изменить вспомогательную функцию.

Алгоритмической основой оптимального проектирования являются локальные методы оптимизации по одному критерию (локальные поисковые методы), когда начальная точка поиска $\mathrm{x}^0 \in D$.

Реализация различных задач многокритериальной оптимизации (например, метода последовательной оптимизации критериев) и нелокальных методов фактически базируется на многократном применении локальных методов.

Математический аппарат нелинейного программирования можно условно разделить на методы детерминированного поиска, методы случайного поиска, методы моделирования процесса эволюции живых организмов, комбинированные методы и др.

Рассмотрим подробно некоторые алгоритмы, относящиеся в основном к методам детерминированных процедур и случайного поиска.

Наиболее классический пример детерминированных методов – метод градиентов.

Известно, что если функция $F(\mathrm{x})$ непрерывна и дифференцируема в некоторой области $D \in R^n$, включая границу, то существует векторная функция-градиент

$$\operatorname{grad} F(\mathrm{x}) = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial F(\mathrm{x})}{\partial x_i} \mathrm{x}_i^0,$$

которая является нормалью к поверхности уровня $F(\mathrm{x}) = \mathrm{const}$ в точке x, и плоскость, ортогональная этой нормали, – касательная к поверхности уровня; x_i^0 – вектор единичной длины, направленный в положительном направлении i-й оси координат.

Из всех производных по всем направлениям в данной точке $x \in D$ производная по направлению $\text{grad} F(x)$ является максимальной и равной $\|\text{grad} F(x)\|$.

Это обстоятельство привело к распространению широкого спектра методов поиска, в которых движение из достигнутой к этому времени точки x выполняется по направлению $\text{grad} F(x)$.

Частые производные функции $F(x)$ приближенно определяются численным дифференцированием, например

$$\left.\frac{\partial F(x)}{\partial x_i}\right|_x \approx \frac{F(x + \tau x_i^0) - F(x)}{\tau},$$

где τ – так называемый пробный шаг в направлении x_i^0.

Для численного определения градиента в точке x необходимо кроме вычисления функции $F(x)$ выполнять по очереди приращения по каждой координате и вычислять при этом значение $F(x + \tau x_i^0)$, $i = 1, 2, \dots, n$. Таким образом, для вычисления градиента в некоторой точке требуется $(n+1)$-кратное вычисление целевой функции.

Основная идея градиентных методов – движение из достигнутой в ходе поиска точки по градиенту целевой функции [по антиградиенту в случае нахождения минимума $F(x)$] или, по крайней мере, как можно ближе к нему – решает вопрос выбора направления движения, оставляя открытым вопрос длины шага по этому направлению.

Алгоритмы градиентных методов отличаются прежде всего выбором длины шага.

Рассмотрим варианты градиентных методов, предназначенных для решения задач минимизации.

1. Шаг h назначается заранее так, чтобы в точках, отстоящих друг от друга на расстоянии h, градиент целевой функции менялся незначительно. В точке x^k, достигнутой после k шагов поиска, вычисляется $\text{grad} F(x)^k$, определяется следующая точка

$$x^{k+1} = x^k - h \frac{\text{grad} F(x^k)}{\|\text{grad} F(x^k)\|}$$

и вычисляется $F(x^{k+1})$.

Если оказывается, что $F(x^{k+1}) < F(x^k)$, то вычисляется $\text{grad} \times F(x^{k+1})$, а затем также определяется следующая точка x^{k+2} и т.д.

Если $F(x^{k+1}) \geqslant F(x^k)$, то поиск останавливается. Результатом поиска считается точка x^k.

Этот алгоритм можно развить, отрегулировав шаг в некоторых заранее заданных пределах, т.е. $0 < h_1 \leqslant h \leqslant h_2$, причем шаг h должен увеличиваться, если угол между единичными векторами градиента в последовательных точках x^k и x^{k+1} меньше некоторого заранее заданного значения ϵ, и уменьшаться при $F(x^{k+1}) \geqslant F(x^k)$.

Поиск в этом случае оканчивается, если $h < h_1$, а результатом считается по-прежнему точка x^k – лучшая из достигнутых в ходе этого поиска.

2. Шаг заранее не назначается, а выбирается следующим образом. Целевая функция $F(x)$ порождает на полупрямой, выходящей из x^k в направлении антиградиента $-\text{grad} F(x)$, функцию одной переменной

$$\Phi(h) = F\left(x^k - h \frac{\text{grad} F(x^k)}{\|\text{grad} F(x^k)\|}\right), \; h > 0.$$

Можно показать, что при достаточно малых значениях h функция $\Phi(h)$ убывает, а затем, проходя при некотором значении $h = H$ минимум, начинает возрастать. Очевидно, двигаться по направлению антиградиента от точки x^k выгодно не далее, чем на расстояние H.

Для того чтобы определить H, нужно провести минимизацию функции $\Phi(h)$. Движение в соответствии с указанным правилом называется наискорейшим спуском.

Разработаны различные алгоритмы, реализующие градиентные методы поиска. В программном обеспечении, использованном при оптимальном проектировании АД, принят, например, следующий вариант метода наискорейшего спуска.

Пусть x^k – лучшая из достигнутых точек

$$v_k = -\text{grad}(F x^k)).$$

В направлении v_k выбираем две точки x_1^k, x_2^k, причем точку x_1^k выбираем так, чтобы

$$F(x_1^k) < F(x^k).$$

Если это требование не выполняется, то x_1^k выбираем ближе к x^k до тех пор, пока это требование не будет выполнено. Если при этом сближении окажется, что

$$\rho(x^k, x_1^k) < \epsilon,$$

то считаем, что минимум целевой функции $F(x)$ найден и равен $F(x^k)$. Здесь ρ – расстояние между точками, а ϵ – малое, заранее заданное положительное число.

Точку x_2^k принимаем произвольно и строим параболу, проходящую через точки $F(x^k)$, $F(x_1^k)$, $F(x_2^k)$:

$$y(h) = a_0 h^2 + a_1 h + a_2.$$

Для этой параболы находим точку x^k_{min}, в которой $y(h)$ минимально, и проверяем условие

$$R = \frac{|y_1(x^k_{min}) - F(x^k)|}{|F(x^k_{min})|} \leqslant \epsilon_1.$$

Если условие $R \leqslant \epsilon_1$ выполняется, то x^k_{min} принимаем за лучшую точку на направлении v_k, т.е. $x^{k+1} = x^k_{min}$.

Если условие $R \leqslant \epsilon_1$ не выполняется, то одну из точек x_1^k или x_2^k заменяем на x^k_{min} и строим новую параболу. Минимальная точка новой параболы подвергается описанному исследованию. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет выполнено условие $R \leqslant \epsilon_1$.

Методы случайного поиска. Рассмотрим основную идею метода случайного поиска. Программно создаем генератор псевдослучайных чисел с квазиравномерным распределением. Будем считать, что за одно обращение к генератору получаем точку в n-мерном пространстве.

Пусть известна точка $x^k \in D$. В некоторой ее окрестности генерируется точка x^{k+1}, и если она также оказалась в допустимой области и, кроме того, $F(x^{k+1}) < F(x^k)$, то "переходим" в точку x^{k+1} и таким же способом ищем лучшую точку уже в ее окрестности.

В противном случае поиск продолжается в окрестности точки x^k, и если количество неудачных попыток найти лучшую точку становится достаточно большим, то принимаем, что в точке x^k находится искомый минимум. Если поиск начинается за пределами допустимой области, то движение в допустимую область производится путем минимизации специальных вспомогательных функций. Подобные алгоритмы метода случайного поиска приняты в программном обеспечении оптимального проектирования АД.

Многоэкстремальные и овражные ситуации. Нелокальные методы поиска. В большинстве случаев доказать существование и единственность решения задачи оптимального проектирования АД не удается. Очевидно, возможны случаи, когда задача может и не иметь решения.

Однако в правильно поставленных технических задачах (при условии, что математическая модель достаточно точно отображает объект проектирования), как правило, решение задачи существует либо некорректность постановки задачи достаточно быстро обнаруживается.

Значительно большие трудности представляют собой задачи, в которых имеется несколько экстремальных точек. В этих случаях обычно требуется найти лучшую из них, т.е. глобальный экстремум. Для этого, если об экстремумах ничего заранее неизвестно, нужно найти все локальные экстремумы и сопоставить значение целевой функции в этих точках. Между тем в общем случае поиск методами нелинейного программирования не гарантирует определения всех локальных экстре-

мумов, а следовательно, и глобального. Поэтому невозможно оценить результаты поиска, располагая лишь внутренней информацией, которая получена в ходе локального поиска, и обычно приходится сопоставлять результаты оптимизации, независимо получаемые для подобных машин теми или иными способами.

Задача оказывается многоэкстремальной, если многоэкстремальна сама целевая функция $F(x)$ в пределах допустимой области D [причем в некоторых случаях многоэкстремальность может возникнуть в результате реализации $F(x)$ на ЭВМ] и если допустимая область неодносвязна. Иногда многоэкстремальность может оказаться устранимой при изменении значений лимитеров, входящих в функциональные ограничения.

При локальном поиске пробные точки берутся вблизи опорной, поэтому если уже достигнут локальный экстремум, то все дальнейшие попытки улучшить результат оказываются безуспешными, а соответствующие пробные точки – неудачными. На этом часто строится критерий останова локального поиска. Поиск останавливается тогда и только тогда, когда достаточно долго не удается улучшить уже достигнутый результат.

Такое же явление может произойти в так называемой овражной ситуации. Одной из простейших причин возникновения овражной ситуации является наличие так называемых существенных аргументов, мало влияющих на значения целевой функции. Аргументы, изменение которых сильно влияет на изменение значений целевой функции, называют несущественными.

В ходе локального поиска, быстро выполнив оптимизацию по несущественным аргументам, попадем в так называемую зону эквивалентности (близости значений целевой функции), и локальный поиск может остановиться далеко от экстремума. Овражные ситуации могут возникнуть при неудачном выборе масштаба аргументов или из-за неблагоприятного взаимного расположения границы допустимой области D и линий уровня целевой функции.

При решении многоэкстремальных задач и в так называемых овражных ситуациях алгоритмы локального поиска при их автономной работе становятся неэффективными. Для решения многоэкстремальных и овражных задач используются методы нелокального поиска. Идея нелокального поиска состоит в проведении некоторой последовательности локальных поисков с обработкой и использованием получающихся результатов.

Вид локального метода поиска, с помощью которого определяется экстремум в этих случаях, часто оказывается несущественным. Это подтверждается исследованиями, проводимыми специалистами СССР и ЧССР в рамках Интерэлектро по апробации методов оптимального проектирования.

К методам нелокального поиска можно отнести как овражный алгоритм поиска, так и алгоритм исследования области поиска, причем наиболее естественно применять сначала алгоритм обзора области, определяющий возможные места оврагов (сгущения), а затем алгоритм овражного поиска для заданных сгущений.

Опишем вначале алгоритм исследования (обзора) области поиска. Этот алгоритм использует результаты локальных поисков из начальных точек, принадлежащих заданной области поиска, группируя их в сгущения. Каждое из сгущений либо определяет локальный экстремум, либо свидетельствует о наличии овражной ситуации. Алгоритм выполняет выбор начальных точек локальных поисков в пределах заданной области, причем их расстояние от центра области постепенно уменьшается, а скорость этого уменьшения и количество локальных поисков, проводимых при исследовании, зависят от кучности результата. После проведения локальных поисков производят сортировку по сгущениям.

Пусть i – порядковый номер локального поиска; $\mathbf{B}_{\text{н}i}, \mathbf{B}_{\text{к}i}$ – начальная и конечная точки локального поиска; $F_{1,i-1}$ – наилучшее значение первого критерия, достигнутое до проведения i-го локального поиска; λ_k^0, $k = 1, 2, \ldots,$ – некоторая последовательность случайно направленных векторов, начала которых находятся в начале координат, а концы равномерно распределены по поверхности единичной сферы; M_1, M_2 – константы, определяющие предельное количество локальных поисков, проводимых при исследовании области поиска; R_i – расстояние начальной точки i-го локального поиска от центра заданной области; ρ_{max} – величина, характеризующая размер сгущения; d_F – коэффициент, определяющий, какие локальные поиски отбраковываются как явно неудачные; Δ – допуск на увеличение критерия; τ – ориентировочное число сгущений.

Вначале $i = 1$, $\tau = 1$, $R = 1$.

1. Определяем очередную начальную точку $\mathbf{B}_{\text{н}i} = R_i \lambda_i^0$.

Из точки $\mathbf{B}_{\text{н}i}$ проводим очередной локальный поиск, в результате которого определяем экстремальную точку $\mathbf{B}_{\text{к}i}$. Если $i = 1$, то запоминаем $\mathbf{B}_{\text{к}i}$ и $F_1(\mathbf{B}_{\text{к}i})$ и переходим к п. 3. В противном случае проверяем условие

$$F_1(\mathbf{B}_{\text{к}i}) > F_{1,i-1}^{min} + d_F \Delta.$$

Если оно выполняется, переходим к п. 3, иначе выполняется п. 2.

2. Пусть к началу i-го поиска хранятся результаты

$$Q_j = (\mathbf{B}_{\text{к}j}, F(\mathbf{B}_{\text{к}j})), \; j = 1, 2, \ldots, l; \; l \leqslant i-1.$$

Тогда запоминаем результат Q_j под номером $l+1$, т.е. полагаем $Q_{l+1} = Q_i$.

Определяем квадрат расстояния

$$L_{l+1}^2 = \min_{1 \leqslant j \leqslant l} |\mathbf{B}_{\text{н}j} - \mathbf{B}_{l+1}|^2.$$

Если $L_{l+1}^2 > \rho_{max}$, увеличиваем τ на единицу и переходим к следующему пункту.

3. Вычисляем радиус

$$R_{i+1} = \frac{M_1 - i}{M_1} - M_2\left(\frac{i}{\tau} + 1\right)^2.$$

При $R_{i+1} > 0$ увеличиваем i на единицу и переходим к п. 1, иначе начинаем сортировку результатов.

Пусть полученным выше способом накоплено k результатов. Это множество результатов разбивается на подмножества

$$M_\nu, \; \nu = 1, 2, \ldots, k_1, \; k_1 \leqslant k,$$

которые в дальнейшем будем называть сгущениями. Алгоритм обзора области поиска завершен.

Овражный алгоритм использует результаты локальных поисков, которые необходимы для отслеживания "дна оврага".

Решение овражной задачи (нелокальный поиск) фактически представляет собой поиск на "дне оврага", т.е. на той поверхности, куда попадают конечные точки локальных поисков.

В некоторой окрестности лучшей точки **A** изучаемого сгущения выбирают (например, случайным образом) начальную точку и из нее проводят локальный поиск. Если его конечная точка **B** "лучше", чем точка **A**, то "переходят" в точку **B** из которой случайным образом выбирают следующую начальную точку. В противном случае начальные точки по-прежнему выбирают в окрестности точки **A**, и если достаточно долго не удается улучшить таким образом общий результат, то овражный алгоритм заканчивает свою работу.

Размеры окрестности регулируют в ходе овражного поиска, но при этом сохраняют их бóльшими, чем при локальном поиске, но меньшими по сравнению с заданной областью поиска. Пусть в результате исследования области поиска было построено k_1 непустых сгущений ($k_1 \leqslant k$).

Тогда алгоритм решения овражной задачи может быть применен k_1 раз. Каждый раз исходной информацией является лучший результат очередного сгущения:

$$Q_\nu = (\mathbf{B}_\nu^*, F(\mathbf{B}_\nu^*)),$$

где $\mathbf{B}_\nu^*$ – лучшая точка очередного, ν-го сгущения; $F(\mathbf{B}_\nu^*)$ – значение критериальной функции в этой точке.

Сгущения перебирают в порядке ухудшения их лучших результатов. При решении овражной задачи могут быть использованы различные методы (например, приемы случайного поиска).

Методы решения многокритериальных задач. Рассмотрим некоторые методы. Для получения оптимальной точки в многокритериальной постановке (2.3) – (2.5) может быть использован ЛП-поиск.

ЛП-поиск. Алгоритм состоит из нескольких человеко-машинных процедур.

Процедура 1. ЭВМ автоматически составляет неупорядоченную матрицу испытаний: с помощью равномерно распределенной последовательности ЛП осуществляется обзор ("зондирование") пространства параметров. Число испытаний N задается. В каждой точке после проверки функциональных ограничений, т.е. в точках допустимой области, вычисляют все частичные критерии и составляют матрицу испытаний:

$$\left\| \begin{matrix} F_1(\mathbf{B}_1) & F_2(\mathbf{B}_1) & \dots & F_k(\mathbf{B}_1) \\ F_1(\mathbf{B}_2) & F_2(\mathbf{B}_2) & \dots & F_k(\mathbf{B}_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_1(\mathbf{B}_N) & F_2(B_N) & \dots & F_k(\mathbf{B}_N) \end{matrix} \right\| .$$

Процедура 2. С помощью ЭВМ составляют упорядоченную матрицу испытаний, в которой значения целевых функций располагают в порядке возрастания, т.е.

$$F_j(\mathbf{B}_{i_1}) \leqslant F_j(\mathbf{B}_{i_2}) \leqslant \dots \leqslant F_j(\mathbf{B}_{i_N}),$$

где $i_1, i_2, \dots, i_N$ – номера соответствующих пробных точек.

Процедура 3. В этой процедуре проектировщик должен выбрать критериальные ограничения F_j, т.е. он должен сформулировать свои требования к проектируемой машине. Проектировщик заинтересован в уменьшении критериальных ограничений, однако при выборе слишком малых значений критериальных ограничений множество допустимых машин может быть пустым.

Процедура 4. ЭВМ осуществляет проверку совместимости критериальных ограничений. Так как значения всех критериев F_k во всех пробных точках $\mathbf{B}_i$ имеются, то можно проверить, будут ли в каждой точке $\mathbf{B}_i$ выполняться все неравенства:

$$F_1(\mathbf{B}_i) \leqslant F_1^*, F_2(\mathbf{B}_i) \leqslant F_2^*, \dots, F_k(\mathbf{B}_i) \leqslant F_k^*,$$

где $F_1^*, F_2^*, \dots, F_k^*$ – критериальные ограничения.

Если такие точки $\mathbf{B}_i$ есть, то тем самым получено множество допустимых решений. Если точек, удовлетворяющих одновременно всем ограничениям, нет, то следует вернуться к процедуре 3 и предложить проектировщику ослабить назначаемые им ограничения, чтобы потом снова повторить процедуру 4 с новыми ограничениями.

Многокритериальные задачи, сводимые к одному критерию типа (2.7). Обычно эти задачи решают методами локального и нелокального поисков, описанными выше для однокритериальных задач. Определяют точку (точки) $\mathbf{B}^{min}$ в области D, для которой $F(\mathbf{x})$ минимально.

Анализируют значения

$$F_1(\mathbf{B}^{min}), F_2(\mathbf{B}^{min}), \dots, F_k(\mathbf{B}^{min}).$$

Если проектировщика не удовлетворяют некоторые значения $F_j(\mathbf{B}^{min})$, то коэффициенты β_i выбирают заново и расчет повторяют.

Выделение главного критерия. Выбирают главный критерий, например $F_1(\mathbf{x})$, который требуется минимизировать. Для остальных критериев назначают допуски, превышение которых нежелательно. Тогда формально остальные критерии

$$F_2(\mathbf{x}), F_3(\mathbf{x}), \dots, F_k(\mathbf{x})$$

переводят в ранг ограничений с соответствующими лимитерами. В качестве критерия соответствия ограничительным требованиям вводят, например, функцию

$$\Phi(\mathbf{x}) = \left[\sum_{\substack{i > 1 \\ F_i > F_i^*}} \left(t_i \, \frac{F_i - F_i(\mathbf{x})}{F_i^*} \right)^2 \right]^{1/2} .$$

Коэффициенты t_i назначают в результате экспертных оценок. Таким образом, общая многокритериальная задача сводится к двухкритериальной: найти точки $\mathbf{x}$, в которых одновременно минимальны функции $F_1(\mathbf{x})$ и $\Phi(\mathbf{x})$.

Эту задачу решают следующим образом. Назначают допустимое нарушение ограничений $\delta > 0$. Область компромиссных решений определяют как

$$0 < \Phi(\mathbf{x}) \leqslant \delta.$$

Для выбора наилучшего компромиссного решения многократно решают задачу

$$\min_{0 < \Phi(\mathbf{x}) \leqslant \delta} F_1(\mathbf{x})$$

при различных значениях исходных данных.

После выполнения оптимизации проектировщик проводит анализ: достигнуто ли желаемое значение $F_1(\mathbf{x})$ и за счет нарушения каких ог-

раничений оно достигнуто. В зависимости от результата этого анализа проектировщик должен усилить или ослабить критериальные ограничения, уточнить значение весов t_i, ввести новые ограничения, новый критерий оптимальности, назначив для старого соответствующее ограничение, изменить набор варьируемых параметров и продолжить поиск. Этот процесс должен продолжаться, пока не будет получено оптимальное с точки зрения проектировщика значение частных критериев в рамках допустимых ограничений. Полученный оптимальный вариант уточняют с помощью поверочных расчетов.

2.3. АРХИТЕКТУРА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АД

Назначение и режимы работы системы. Повышение производительности и качества работы проектировщиков при разработке серий электрических машин, обоснованный выбор параметров приводят к необходимости использования систем оптимального проектирования на базе ЭВМ. В таких системах человек принимает на себя творческую часть процесса проектирования – выбор вариантов оптимизируемых двигателей, задание технических ограничений и целевых функций, оценку результатов и т.п., а вычислительная система производит выполнение сложных алгоритмических процессов, в том числе поиск оптимальных параметров двигателей на основе принятой математической модели.

Оптимальное проектирование АД на ЭВМ выполняется на базе автоматизированной системы, обеспечивающей принятие оптимальных решений при конструировании АД. Гибкость системы определяется главным образом ее архитектурой и программным обеспечением, предоставляющим пользователям удобство взаимодействия и эффективные методы поиска.

Существенными чертами системы автоматизированного оптимального проектирования являются:

системность, т.е. объединение частных подходов, программ и процедур в единый комплекс;

четкость задания цели – возможность, предоставляемая пользователям, легко формулировать различные этапы оптимального проектирования (обзор области, локальный поиск, нелокальный поиск и др.) с четким описанием, какие величины варьируются, каким ограничениям они должны удовлетворять, каковы критерии оптимизации;

эволюционность, т.е. наличие условий для легкой модификации как непосредственно самой системы оптимизации, так и программ математической модели асинхронного двигателя.

Технические средства и программное обеспечение современных ЭВМ позволяют вести расчетное проектирование в пакетном и диалоговом режимах.

Пакетный режим предполагает, что инженеры-расчетчики проектирующего подразделения передают в вычислительный центр задание – полную систему исходных данных, позволяющую ЭВМ автоматически получать результаты оптимизационных или поверочных расчетов в форме итоговых документов, которые передаются в проектирующее подразделение, а также могут храниться в специальных архивах ЭВМ для повторной выдачи или для использования в диалоговых поверочных расчетах.

Выполнение диалоговых поверочных расчетов позволяет проектировщикам оперативно производить доводку найденных оптимальных вариантов АД, а также оперативно получать необходимую дополнительную информацию о различных режимах работы АД.

Для эффективной работы диалоговой подсистемы в подразделениях проектировщиков непосредственно на рабочих местах должны быть установлены персональные ЭВМ, соединенные с основной ЭВМ средствами телекоммуникаций.

Программные средства подсистемы диалоговых расчетов предоставляют проектировщику следующие возможности:

осуществлять ввод и корректировку исходных данных с дисплея;

использовать в качестве исходных данных результаты оптимизационного расчета;

оперативно получать результаты расчетов на экране дисплея;

управлять ходом выполнения расчетов, формами получения результатов на алфавитно-цифровом печатающем устройстве (АЦПУ), числом копий исходных данных и результатов на печати и т.п.

Система оптимального проектирования АД использует пакетный и диалоговый режимы работы.

Общая схема взаимодействия проектировщиков с ЭВМ приведена на рис. 2.1.

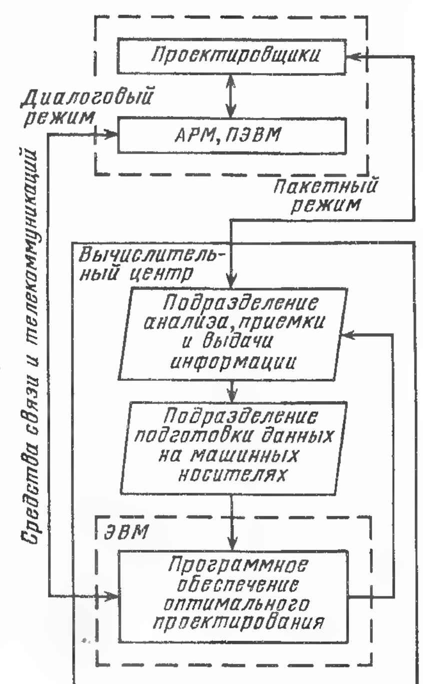


Рис. 2.1. Общая схема взаимодействия проектировщиков с ЭВМ в пакетном и диалоговом режимах

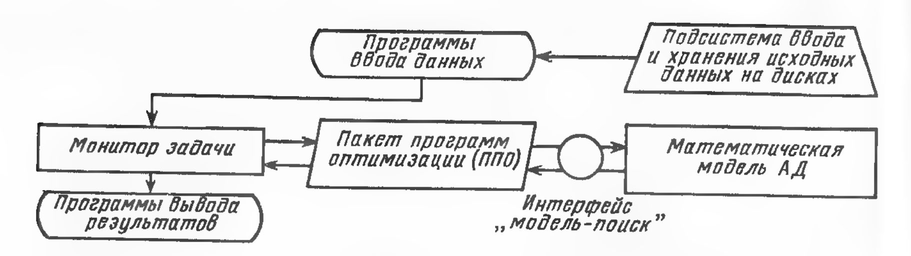


Рис. 2.2. Программное обеспечение оптимального проектирования

Архитектура системы оптимального проектирования. Для выполнения задач оптимального расчетного проектирования организуется специальное программное обеспечение – программный комплекс, содержащий: монитор задачи; пакет программ оптимизации (ППО); сервисные средства, обеспечивающие ввод данных и вывод результатов; системные программы для связи между прочими программами и др.

Пакет программ оптимизации в процессе работы обращается к программе математической модели (специальные программные средства могут предварительно сгенерировать программу математической модели).

Для выполнения оптимального расчетного проектирования используется также система ввода и хранения исходных данных в специальных библиотеках на дисках.

Рассмотрим программное обеспечение оптимального проектирования (рис. 2.2).

Монитор задачи – это управляющая программа, обеспечивающая автоматический процесс проведения массовых оптимизационных расчетов АД и общение пользователя с системой. Монитор обеспечивает: ввод информации, необходимой для оптимального расчета группы двигателей, контроль правильности выполнения оптимального расчета и вывод результатов в требуемой форме на печать или в библиотеки для последующего использования.

Входной информацией для монитора задачи являются:

тип АД;

номер варианта расчета данного АД. Для одного типа АД может быть проведено несколько расчетов с отличающимися исходными данными (например. с использованием разных марок сталей или разных форм пазов), поэтому данный расчет, а также исходные данные для него идентифицируются еще и номером, который будем называть номером варианта;

вектор вариантности, который определяет конфигурацию математической модели и тип расчета (поисковый или поверочный);

набор входных величин, необходимых для электромагнитного, теплового, экономического расчетов двигателя.

При проведении оптимизационных (поисковых) расчетов кроме перечисленных выше данных необходимо указать:

величины, являющиеся варьируемыми параметрами, их начальные значения и размеры области поиска;

критерии оптимизации, их старшинство, допуски на критерии, величины, в которых измеряются допуски (относительные или абсолютные) и координатная точность оптимизации для каждого критерия:

лимитируемые величины и ограничения на них.

Заданная таким образом информация является полным комплектом исходных данных. Она идентифицируется номером варианта и будет в дальнейшем называться вариантом.

Часто информация для нового варианта расчета мало отличается от одного из ранее созданных комплектов исходных данных. В этих случаях удобно новый комплект исходных данных формировать на базе ранее созданного полного (базового) комплекта, введя в него необходимые добавления или изменения. Тогда для формирования нового комплекта исходных данных необходима лишь следующая информация, составляющая дополнение:

тип АД;

номер варианта расчета, для которого создается новый комплект исходных данных;

номер варианта расчета, полный комплект исходных данных которого принимается за базовый;

собственно добавления и (или) изменения к базовому комплекту исходных данных.

В этом случае монитор задачи организует поиск и ввод в оперативную память нужного комплекта исходных данных базового варианта из соответствующей библиотеки на диске и образует новый вариант исходных данных.

Решение непосредственно задач оптимизации различного типа осуществляется с помощью ППО. Пакет программ оптимизации представляет собой совокупность программных средств, ориентированных на принятие оптимальных решений в процессе проектирования АД. Структурно ППО состоит из программы-планировщика и набора программных модулей проблемного и вспомогательного характера.

По значению одного из параметров, задаваемых пользователем и передаваемых в ППО через монитор задачи, планировщик выбирает цепочку программ-модулей, осуществляющих соответствующий этап принятия оптимального решения (тип оптимизации). Пакет ППО позволяет реализовать достаточно автономно следующие этапы принятия решений:

исследование заданной области поиска и выявление количества и расположения экстремумов и оврагов;

выполнение локального поиска из точки, заданной в допустимой области;

выполнение локального поиска с предварительным определением точки допустимой области (движение в допустимую область);

решение овражных задач;

поверочный расчет по поисковой модели.

Проектировщик, выполнив с помощью ЭВМ определенный этап, может после анализа результатов перейти к любому другому этапу.

Программные средства ППО обеспечивают решение многокритериальных задач методом последовательных уступок. На всех этапах оптимизации можно использовать приемы как с явным учетом ограничений, так и без учета ограничений (с применением, например, штрафных функций).

Отметим назначение основных программ-модулей, входящих в ППО.

Подпрограмма "Исследование области поиска" организует серию локальных поисков из точек, принадлежащих области, описанной в исходных данных. Результаты локальных поисков группируются в сгущения, каждое из которых может быть локальным экстремумом или может свидетельствовать о наличии овражной ситуации.

Подпрограмма "Решение овражной задачи" использует информацию, полученную при исследовании области поиска, обрабатывая сгущения по овражному алгоритму.

Подпрограмма "Организация последовательной оптимизации" обеспечивает выполнение многокритериальной локальной оптимизации методом последовательных уступок.

Подпрограмма "Локальный поиск" определяет локальный экстремум по критерию, назначенному программой, организующей локальный поиск.

Подпрограмма "Интерфейс поиск-модель" обеспечивает согласование параметров ППО и математической модели двигателя.

Использование режима диалога для поверочных расчетов АД. Выполнение поверочных расчетов в режиме диалога позволяет оперативно производить доводку найденных ЭВМ оптимальных вариантов АД, а также оперативно получать необходимую дополнительную информацию о различных режимах работы АД. Часто выполнение диалоговых расчетов сводится к последовательным изменениям параметров относительно некоторых базовых вариантов. Базовые варианты, введенные с перфокарт или полученные путем оптимизации, обычно находятся в специальной библиотеке исходных данных поверочных расчетов.

Для выполнения поверочных расчетов АД в режиме диалога на ЭВМ разработана диалоговая подсистема, которая предоставляет проектировщику следующие возможности:

вводить исходную информацию из библиотеки исходных данных или результаты оптимизационного расчета;

непосредственно управлять ходом выполнения расчетов;

осуществлять ввод и корректировку исходной информации с дисплея;

оперативно получать результаты расчетов на экране дисплея;

управлять получением формы распечатки результатов на АЦПУ;

управлять получением копий информации, содержащейся на экране.

Для общения пользователя с ЭВМ разработан диалоговой язык. Он включает директивы, подаваемые пользователем с дисплея, ответы и запросы ЭВМ пользователю. Ответы ЭВМ содержат краткие сообщения о выполненной работе, например "Информация введена. Что делать?", либо таблицы данных. Запросы ЭВМ содержат указания пользователю на выполнение некоторых действий, например "Ввести исходные данные" и т.п. Директивы набираются на клавиатуре дисплея и позволяют пользователю выполнять следующие действия: запускать выполнение поверочных расчетов; вводить и корректировать исходную информацию; инициировать из ЭВМ вывод результатов на экран дисплея и на печать.

Любая директива диалоговой системы обрабатывается стандартно: прием директивы с дисплея в память ЭВМ, анализ директивы и передача управления соответствующему программному модулю, вывод ответа из ЭВМ на экран дисплея.

Для удобства работы пользователей в системе при выводе на дисплей исходных данных и результатов расчетов реализована страничная организация данных. Каждая страница занимает экран дисплея. Для визуального контроля и оперативной коррекции исходные данные сгруппированы в четыре страницы:

Номер страницы	Содержание страницы
01	Основные данные
02	Обмоточные данные и размеры сердечника статора
03	Обмоточные данные и размеры сердечника ротора
04	Коэффициенты

Для удобства оценки основные результаты поверочного расчета сгруппированы в три страницы.

В усовершенствованном варианте описанной выше диалоговой системы автоматизированной разработки АД при каждом поверочном расчете на экране дисплея одновременно высвечиваются четыре варианта: базовый и три альтернативных. Каждый вариант включает: исходные данные — изменяемые данные обмоточной записки, выходные данные — основные показатели АД. Предусмотрена возможность формирования критериальной функции и включение ее в число выходных данных.

Проектировщик может попытаться осуществить вручную движение к наилучшему варианту путем последовательного изменения исходных данных вариантов, показываемых на дисплее. Пользователь на любом шаге может вывести на печать расчетный формуляр выбранного варианта или сформированную на его основе таблицу обмоточных данных.

Организация программ многовариантных моделей. Для решения каждой конкретной задачи оптимального проектирования требуется сформулировать программный комплекс, в который входят все необходимые в данном случае программы. Поэтому при разработке программного обеспечения возникает вопрос о способах генерации программных комплексов.

Особое место занимает вопрос генерации программ математических моделей проектируемых машин. Программа математической модели, являясь частью программного комплекса, составленного для проектирования, часто сама оказывается сложным программным комплексом. Это происходит, в частности, при проектировании серий машин, когда приходится проводить оптимизацию объектов, отличающихся лишь конструктивным исполнением отдельных элементов. При этом обычно возникает такая ситуация: общая схема расчета проектируемых объектов остается той же самой, их математические модели состоят из одних и тех же частей или блоков, но содержимое этих блоков может меняться в зависимости от принятых конструктивных решений (или выбранных модификаций проектируемой машины). Чем более развита серия машин, тем больше разнообразных вариантов просматривается при ее проектировании, тем больше различных вариантов каждого блока, да и число блоков, на которые дробится математическая модель, увеличивается; блоки становятся мельче. В этой ситуации, таким образом, математическая модель становится многовариантной.

Модель каждого варианта проектируемой машины представляет собой цепочку блоков a_i, $i = 1, 2, \dots, r$. Каждый из них представлен в модели одним из своих вариантов $a_{ij}, j = 1, 2, \dots, j_m$. Для включения в программу математической модели варианты блоков реализуются в программных модулях m_{ij}, $i = 1, 2, \dots, r$; $j = 1, 2, \dots, j_m$. Всю многовариантную модель можно изобразить в виде графа. Варианты блоков являются его вершинами, а возможные переходы к вариантам следующих блоков – ребрами. При каждом i среди вариантов блоков a_{ij} может быть один пустой, т.е. не выполняющий никаких вычислений.

Варианты проектируемой машины различаются по P_m-признакам, каждый из которых может принимать значения 0 или 1. Каждый вариант поэтому может быть закодирован P_m-значным двоичным числом Q – кодом варианта.

В модели при каждом варианте блока a_{ij} дается логическая функция $l_{ij}(Q)$, по значению которой принимается решение о необходимости включения этого варианта в генерируемую модель, а именно $l_{ij} = 1$ тогда и только тогда, когда соответствующий программный модуль m_{ij} должен быть включен в программу математической модели. Поэтому функции $l_{ij}(Q)$ должны быть таковы, чтобы при любых фиксированных i и Q одно и только одно из чисел $l_{ij}(Q)$ было равным единице, а остальные – нулю.

Таким образом, многовариантная математическая модель состоит из двух частей: арифметической A (блоки a_i в вариантах a_{ij}) и логической L [функции $l_{ij}(Q)$].

Код варианта Q входит в состав исходных данных. По этому коду для каждого i в программу математической модели включается нужный из программных модулей m_{ij}. Так генерируется программа математической модели требуемого варианта проектируемой машины.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПОИСКОВЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ

3.1. ВВЕДЕНИЕ

При обсуждении технического задания на совместное проектирование перспективной унифицированной серии трехфазных короткозамкнутых АД серии АИ на совещании специалистов было принято решение о разработке уточненных методик расчета АД, в том числе методики электромагнитного расчета.

Стране-координатору этой работы – СССР – было поручено разработать методику электромагнитного расчета, предназначенную для поисковых оптимизационных расчетов короткозамкнутых АД, представляющую собой математическую модель установившихся электромагнитных процессов в них. Модель должна обеспечивать расчет всех параметров АД, которые необходимы для полной оценки вариантов расчета и для отбора наилучшего из вариантов по установленному заранее критерию.

Основой для создания модели были полученные страной-координатором от всех стран-членов Интерэлектро, за исключением СРР, методики электромагнитного расчета, расчетные данные и результаты испытаний 70 АД и результаты расчетов четырех АД серии 4А, обмоточные данные которых были предварительно всем разосланы. Все эти материалы позволили стране-координатору оценить сходимость опытных данных и результатов расчетов, выполненных по различным национальным методикам, изучить особенности каждой из этих методик и предложить методику, удовлетворяющую требованиям, предъявляемым к математической модели, предназначенной для поисковых расчетов.

3.2. ТРЕБОВАНИЯ К ПОИСКОВОМУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ РАСЧЕТУ

Методика электромагнитного расчета является частью математической модели поискового расчета короткозамкнутого АД. Поисковый расчет, содержит кроме электромагнитного тепловентиляционный расчет, а также расчет целевой функции, в качестве которой для АД общего

назначения обычно принимается сумма затрат в народном хозяйстве на изготовление АД и его эксплуатацию в течение расчетного срока службы.

Методика поискового расчета должна устанавливать связь между варьируемыми параметрами, целевой функцией и всеми величинами, необходимыми для оценки соответствия варианта АД заранее оговоренным требованиям, стандартам и т.п.

В соответствии с этим методика электромагнитного расчета должна включать в себя: полный перечень исходных данных и варьируемых величин; перечень заранее оговоренных показателей (лимитеров); подготовительные расчеты размеров сердечников, определяемых через варьируемые параметры; расчет магнитной цепи; расчеты размеров обмотки статора и беличьей клетки ротора, а также их активного сопротивления без учета и с учетом вытеснения тока; расчеты индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток статора и ротора без учета и с учетом вытеснения тока и насыщения путей потоков рассеяния; расчет тока и потерь холостого хода; расчет номинального режима или режима при любой заданной мощности; расчет начального пускового момента, начального пускового тока, а также максимального момента и критического скольжения.

Перечень исходных данных должен включать все необходимые и достаточные для дальнейших расчетов величины, как неварьируемые, так и варьируемые; в нем должны быть оговорены обозначения и единицы величин. Должна быть предусмотрена возможность выполнения расчетов для всех наиболее распространенных форм пазов (открытых, полуоткрытых, полузакрытых, а для ротора и закрытых) с трапецеидальной или закругленной клиновой частью, а также для всех видов применяемых обмоток (однослойных, двухслойных, одно-двухслойных).

Теоретически, кроме заданных номинальных данных двигателя, все величины могут быть варьируемыми. Однако опыт проектирования АД позволяет заранее задать многие величины и размеры и не варьировать их в процессе поиска. Сюда относятся числа пазов статора и ротора, вид обмотки, марка стали, т.е. ее характеристика намагничивания и удельные потери, коэффициент заполнения сердечников сталью, толщины пазовой изоляции и т.д. В разработанной методике наибольшее число варьируемых величин равно 15 для АД с двойной клеткой и 11 для АД с простой клеткой ротора. Если заранее оговорена форма паза (например зубец с параллельными стенками), то число варьируемых параметров уменьшается до 8. Часто внешний диаметр сердечника бывает заранее оговорен; это уменьшает приведенные выше числа еще на единицу. Наконец, если производится поисковый расчет АД с заданными размерами листов статора и ротора, то остается всего два варьируемых параметра — длина сердечника и индукция в воздушном зазоре (или число эффективных проводников в пазу статора).

Перечень заранее оговоренных показателей включает в себя список ограничений, которым должен удовлетворять расчетный вариант. Сюда

относятся все данные (начальный пусковой момент, максимальный момент, кратность пускового тока или пусковой мощности и т.д.), оговоренные стандартами или ТУ. Эти ограничения, называемые далее "лимитерами", определяют одностороннюю запрещенную область значений, например "максимальный момент не ниже заданного значения", "пусковая мощность не выше" и т.п. К числу лимитеров, очевидно, относится и превышение температуры обмотки статора. Возможны, в зависимости от назначения двигателя, и другие лимитеры.

Подготовительные геометрические расчеты размеров сердечников статора и ротора устанавливают связь между варьируемыми и заданными размерами сердечников, с одной стороны, и всеми остальными размерами, необходимыми на дальнейших этапах расчета, с другой. При этом должны быть оговорены все ограничения размеров, диктуемые технологическими и прочностными соображениями, такие, например, как минимально допустимые ширины зубцов и пазов и минимально допустимые высоты спинок статора и ротора. На этапе поисковых расчетов можно не учитывать несущественные размеры, практически не влияющие на результаты дальнейших расчетов. К числу таких размеров относится, например, радиус закругления между боковой стенкой паза и его клиновой трапецеидальной частью.

При расчете магнитной цепи в связи со стремлением к высокому использованию стали должны учитываться все особенности конструкции магнитного сердечника, ведущие к местным насыщениям, например канавки в спинке статора, предназначенные для скрепления сердечника скобами. В то же время должно учитываться и явление, ведущее к снижению индукций в сердечнике: вытеснение потока из зубцов в пазы, из спинки статора — в корпус, из спинки ротора — в вал.

Расчет рабочего режима желательно производить непосредственно по заданной полезной мощности, а не через предварительное вычисление характеристик АД в зависимости от скольжения. То же относится и к расчету максимального момента.

Все варьируемые величины, относящиеся к поперечным размерам листов статора и ротора, за исключением внешнего диаметра сердечника, как будет показано ниже, задаются в подходяще подобранных относительных единицах. Так, внутренний диаметр задается по отношению к внешнему диаметру сердечника статора, ширины пазов у клиновой части — по отношению к зубцовому делению и т.д. Расчеты в относительных единицах значительно сужают диапазон возможных вариаций переменных и позволяют более обоснованно и уверенно заранее назначать пределы изменений этих величин. Относительные величины приняты также для основных параметров, характеризующих работу АД, а именно, для токов, ЭДС, сопротивлений, мощностей (в том числе и потерь). В качестве базовых приняты номинальное фазное напряжение и номинальная мощность. Отсюда вычисляются и базовые ток и сопротивление. Относительные величины позволяют легче оценивать результаты счета, находить ошибки в вычислениях, а кроме того, упрощают и

ряд расчетных формул (хотя следует признать, что в отдельных случаях эти формулы становятся несколько непривычными по форме и в силу этого менее наглядными).

При проведении поискового расчета, т.е. при поиске оптимального варианта исходных варьируемых параметров, следует избегать "скачков" при переходе от одного варианта к другому, т.е. необходимо, чтобы все варьируемые величины могли меняться непрерывно. В связи с этим на этапе поискового расчета математическая модель предполагает возможность нецелого числа проводников в пазу и нестандартных размеров обмоточного провода. Необходимые поправки могут быть легко внесены на следующем этапе расчетов в диалоговом или пакетном режиме.

При большом числе варьируемых величин (семь или более) приходится считаться с необходимостью многократного обращения к математической модели в процессе оптимизационного поиска. Практика показывает, что иногда требуется провести несколько тысяч расчетов. Поэтому хотя время, затрачиваемое на каждый расчет, и невелико, тем не менее следует принимать меры к его сокращению. Для этого необходимо в модели избегать сложных итерационных расчетов и даже, по возможности, расчетов с помощью рядов. При большом числе обращений к модели всякое сокращение времени счета может оказаться значимым.

Основное требование к математической модели заключается в том, что она должна давать возможность производить расчеты АД с точностью, не уступающей точности ручных, да и машинных методик, принятых в настоящее время в странах-членах Интерэлектро, а скорее превосходящей их.

В заключение следует отметить, что предлагаемая математическая модель для электромагнитного расчета разработана для наиболее распространенных трехфазных короткозамкнутых АД малой и средней мощности закрытого исполнения, не имеющих радиальных вентиляционных каналов, а также аксиальных вентиляционных каналов в сердечнике статора. Предполагается, что в роторах применены только литые клетки, полностью заполняющие пространство пазов. Предполагается также, что обмотки имеют одинаковое число витков в катушках, причем однослойные обмотки – только диаметральные.

Принятые в модели обозначения величин соответствуют разработанному СССР и принятому странами-членами Интерэлектро документу "Обозначения величин и правила перевода их на машинный алфавит".

3.3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В табл. 3.1 приведен полный перечень всех величин, знание которых необходимо и достаточно для проведения электромагнитного расчета. Методика построена так, что допускает проведение как поискового,

Таблица 3.1

Наименование	Обозначение	Единица
Номинальные данные		
Мощность	P	кВт
Фазное напряжение	U	В
Частота	f	Гц
Число пар полюсов	p	–
Сердечник статора		
Внешний диаметр сердечника	D_{a1}	мм
Длина сердечника	l_1	мм
Внутренний диаметр сердечника:		
абсолютное значение	D_{ai1}	мм
относительное значение	D_{pi1}	–
Канавки для крепления сердечника:		
ширина	b_{f1}	мм
глубина	h_{f1}	мм
количество	N_{f1}	–
Число пазов	z_1	–
Высота паза:		
абсолютное значение	h_{az1}	мм
относительное значение	h_{pz1}	
Высота шлица паза	h_{c1}	мм
Ширина шлица паза*1:		
абсолютное значение ширины или ее части, не зависящей от ширины паза	b_{ac1}	мм
относительное значение ширины или ее части, пропорциональной ширине паза	b_{pc1}	–
Ширина или диаметр верха паза:		
абсолютное значение	b_{ak1}	мм
относительное значение	b_{pk1}	–
*Ширина или диаметр дна паза**2:		
абсолютное значение	b_{ag1}	мм
относительное значение	b_{pg1}	–
Тангенс угла наклона верха паза*3	$\operatorname{tg}\alpha_{k1}$	–
Радиус закругления дна паза*4:		
абсолютное значение	r_{ag1}	мм
относительное значение	r_{pg1}	–
Индекс формы паза *5	a_{n1}	–
Уменьшение ширины паза в свету (припуск на сборку сердечника)	Δ_t	мм
Коэффициент заполнения сердечника сталью	k_j	–
Удельные потери в стали	p_{10}	Вт/кг
Плотность стали	ρ_j	кг/дм^3
Воздушный зазор		
Высота	δ	мм
Индукция в зазоре	B_g	Тл
Сердечник ротора		
Внутренний диаметр сердечника	D_{i2}	мм

Таблица 3.1 (продолжение)

Наименование	Обозначение	Единица
Аксиальные каналы:		
диаметр	d_{l2}	мм
количество	N_{l2}	–
Число пазов	z_2	–
Скос пазов в долях зубцового деления статора	β_x	–
а) Размеры паза одинарной клетки или верхней части двойной клетки		
Высота паза:		
абсолютное значение	h_{az2}	мм
относительное значение	h_{pz2}	–
Высота мостика	h_b	мм
Высота шлица паза	h_{c2}	мм
Ширина шлица паза*1:		
абсолютное значение ширины или ее части, не зависящей от ширины паза	b_{ac2}	мм
относительное значение ширины или ее части, пропорциональной ширине паза	b_{pc2}	–
Ширина или диаметр верха паза:		
абсолютное значение	b_{ak2}	мм
относительное значение	b_{pk2}	–
*Ширина или диаметра дна паза*2:*		
абсолютное значение	b_{ag2}	мм
относительное значение	b_{pg2}	–
Тангенс угла наклона верха паза*3	$\mathrm{tg}\alpha_{k2}$	–
Радиус закругления дна паза*4:		
абсолютное значение	r_{ag2}	мм
относительное значение	r_{pg2}	–
б) Размеры паза нижней части двойной клетки		
Высота паза:		
абсолютное значение	h_{az3}	мм
относительное значение	h_{pz3}	–
Высота шлица:		
абсолютное значение	h_{ac3}	мм
относительное значение	h_{pc3}	–
Ширина шлица:		
абсолютное значение	b_{ac3}	мм
относительное значение	b_{pc3}	–
Ширина или диаметр верха паза:		
абсолютное значение	b_{ak3}	мм
относительное значение	b_{pk3}	–
*Ширина или диаметр дна паза*2:*		
абсолютное значение	b_{ag3}	мм
относительное значение	b_{pg3}	–
Тангенс угла наклона верха паза*3:	$\mathrm{tg}\alpha_{k3}$	–

Таблица 3.1 (продолжение)

Наименование	Обозначение	Единица
Радиус закругления дна паза*4:		
абсолютное значение	r_{ag3}	мм
относительное значение	r_{pg3}	–
Обмотка статора		
Средний шаг:		
геометрический	y_1	–
электрический	y_{e1}	–
Число слоев	N_{s1}	–
Индекс зонности*6	k_{q1}	–
Число параллельных ветвей в обмотке фазы	a_1	–
Предварительное значение диаметра проводника*7	d_{vcu1}	мм
Размеры прямоугольного проводника:		
по высоте паза	h_{cu1}	мм
по ширине паза	b_{cu1}	мм
Число эффективных проводников в пазу	N_{n1}	–
Число элементарных проводников в одном эффективном проводнике	N_{a1}	
Коэффициент заполнения паза проводами:		
конструкционный	k_{n1}	–
технологический	k_{tn1}	–
Длина лобовой части*8:		
абсолютное значение	l_{as1}	мм
относительное значение	l_{ps1}	–
Зазор между лобовыми частями катушек	Δ_{s1}	мм
Прямолинейный участок вылета лобовой части	l_{sl1}	мм
Длина вылета лобовой части*9:		
абсолютное значение	l_{ass1}	мм
относительное значение	l_{pss1}	–
Плотность материала обмотки	ρ_{c1}	кг/дм^3
Расчетная рабочая температура	t_b	°C
Удельная электрическая проводимость материала обмотки при расчетной рабочей температуре	γ_{c1}	МСм/м
Коэффициент адиабаты*10	K	$\frac{А^2 \cdot с}{(мм^4 \cdot {}^\circ C)}$
Система изоляции обмотки статора		
Односторонняя толщина пазовой изоляции	Δ_{n1}	мм
Толщина прокладки	Δ_{l1}	мм
Толщина клина	Δ_{k1}	мм
Двухсторонняя толщина изоляции провода:		
расчетная	Δ_{bc1}	мм
максимальная	Δ_{mc1}	мм
Обмотка ротора		
Плотность материала обмотки	ρ_{c2}	кг/дм^3
Удельная электрическая проводимость материала обмотки при расчетной рабочей температуре	γ_{c2}	МСм/м

Таблица 3.1 (окончание)

Наименование	Обозначение	Единица
Сечение короткозамыкающего кольца:		
абсолютное значение	Q_{ar}	мм^2
относительное значение	Q_{pr}	–
Энергетические показатели		
Предварительное значение коэффициента мощности	$\cos\varphi_v$	–
Предварительное значение КПД	η_v	–
Коэффициент загрузки АД по мощности	ξ	–

*1 При открытом пазе $b_{ac1} = 0$, $b_{cp1} = 1$; при полуоткрытом b_{ac1} задается, $b_{pc1} = 0{,}5$; при полузакрытом b_{ac1}, b_{ac2} задаются, $b_{pc1} = b_{pc2} = 0$.

*2 При круглом пазе $b_{ag1} = b_{ag2} = b_{ag3} = 0$, $b_{pg1} = b_{pg2} = b_{pg3} = 1$.

*3 При открытом пазе $\mathrm{tg}\,\alpha_{k1} = 2$.

*4 При плоском дне паза r_{ag1}, r_{ag2}, r_{ag3} задаются, $r_{pg1} = r_{pg2} = r_{pg3} = 0$; при скругленном дне $r_{ag1} = r_{ag2} = r_{ag3} = 0$; $r_{pg1} = r_{pg2} = r_{pg3} = 1$.

*5 При открытом или полузакрытом пазе $\alpha_{n1} = 1$; при полуоткрытом $\alpha_{n2} = 2$.

*6 При трехзонной обмотке $k_{q1} = 1$, при шестизонной – $k_{q1} = 2$.

*7 При отсутствии указаний $d_{vcu1} = 1{,}06$ мм.

*8 При $l_{as1} \neq 0$ $l_{ps1} = 0$; при $l_{as1} = 0$ $l_{ps1} = 1$.

*9 При $l_{ass1} \neq 0$ $l_{pss1} = 0$, при $l_{ass1} = 0$ $l_{pss1} = 1$.

*10 Для меди $K = 200$ А^2·с/(мм^4·°С), для алюминия $K = 86$ А^2·с/(мм^4·°С).

так и поверочного расчетов. Во втором случае все величины заданы в абсолютных значениях, в первом часть варьируемых величин задаются как относительные. В перечне исходных данных предусмотрены оба варианта задания. При поверочном расчете задаются абсолютные значения величин, а относительные полагаются равными нулю; при поисковом расчете задаются относительные значения варьируемых величин, а абсолютные полагаются равными нулю. Соответственно построены и расчетные формулы. Такой прием позволяет иметь одну и ту же модель и, следовательно, программу для поверочного и поискового расчетов. Этот же прием использован и для случаев, когда необходимая для дальнейшего расчета величина или определяется в процессе расчета, или бывает известна заранее, например при поверочном расчете. Речь идет о длине и вылете лобовой части обмотки статора.

Тип обмотки статора определяется в исходных данных заданием числа слоев и индексом зонности. Одно-двухслойную обмотку следует рассматривать как двухслойную. Обмотка характеризуется также заданием двух значений шага, а именно, средним "электрическим" шагом, который определяет обмоточный коэффициент, и средним "геометрическим" шагом, который определяет длину и вылет лобовой части.

Определение этих шагов для обычных обмоток не вызывает затруднений. Для двухслойных обмоток эти шаги равны, для однослойных электрический шаг равен диаметральному. Если однослойная обмотка выполняется в "развалку", то средний геометрический шаг при четном числе пазов на полюс и фазу q_1 равен

$$y_1 = 2{,}5q_1,$$

при нечетном q_1

$$y_1 = 2{,}5q_1 + 0{,}5q_1.$$

Для одно-двухслойной обмотки средний "электрический" шаг

$$y_{e1} = 2(q_1 + 1),$$

а средний геометрический

$$y_1 = y_{e1} - 2/q_1.$$

В остальном исходные данные в разъяснениях не нуждаются.

3.4. ЛИМИТИРУЕМЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Перечень лимитируемых показателей обычно ограничивается превышениями температуры активных частей и каталожными параметрами АД. Иногда оговариваются и допустимые значения энергетических пока-

Таблица 3.2

Наименование лимитера	Обозначение	Ограничение значения лимитера
Превышение температуры обмотки статора, °С	ϑ	Сверху
Отношение максимального момента к номинальному	k_m	Снизу
Отношение начального пускового момента к номинальному	k_k	"
Отношение начального пускового тока к номинальному	k_i	Сверху
Отношение полной пусковой мощности к номинальной	k_p	"
Скорость нарастания температуры обмотки статора при заторможенном роторе, °С/с	Θ	"
Скольжение при максимальном моменте	s_m	Снизу
Коэффициент полезного действия:		
номинальный	η_n	"
при частичной нагрузке	η_t	"
Коэффициент мощности:		
номинальный	$\cos\varphi_n$	Снизу
при частичной нагрузке	$\cos\varphi_t$	"

зателей — КПД и $\cos\varphi$ — при номинальной или среднестатической нагрузке. Модель дает возможность рассчитать все перечисленные в табл. 3.2 величины, за исключением превышения температуры обмотки статора. Ограничения конструкторского и технологического характеров, накладываемые на отдельные размеры сердечников, указаны непосредственно в модели и в настоящий перечень лимитеров не включены.

3.5. УСЛОВИЯ РАСЧЕТА

В табл. 3.3 приведены все признаки, которыми определяется в дальнейшем выбор расчетных формул. Для того чтобы, не усложняя модели, предусмотреть все возможные сочетания практически встречающихся форм пазов статора и ротора, задаются отдельные признаки для верха (клиновой части), основной части и дна паза. Для шлицевой части признаки не нужны. Методика предусматривает возможность расчета также закрытых пазов ротора (пазов с закрытым шлицом). Для ротора с двойной клеткой отдельно рассматриваются пазы верхней и нижней клеток.

Таблица 3.3

Наименование	Условное обозначение*
Форма паза:	
верх	
	KTi
	KOi
основная часть	
	TOi

Таблица 3.3 (продолжение)

Наименование	Условное обозначение*
Основная часть	TSi**
	TTi***
дно	DTi
	DOi
Размеры паза:	
заданы	ZSi
не заданы	¬ ZSi
Вид клина	XK
	XM

Таблица 3.3 (окончание)

Наименование	Условное обозначение*
Клетка ротора:	
одинарная	¬B
двойная	B
Форма сечения проводника обмотки статора:	
круглая	CO1
прямоугольная	CS1
Число эффективных проводников в пазу статора:	
задано	ZN
не задано	¬ZN
Материал вала:	
магнитный	WM
немагнитный	¬WM
Материал станины:	
чугун	A
алюминий	AA

*Буква i принимает следующие значения: 1 – паз статора; 2 – паз одинарной клетки или паз верхней клетки ротора; 3 – паз нижней клетки ротора.
**Форма паза соответствует зубцу с параллельными стенками.
***То же с непараллельными стенками.

Бутылочные пазы рассматриваются как двойные пазы, различающиеся лишь отсутствием промежуточной щели между верхним и нижним пазами. Для обычной двойной клетки эта щель является шлицом нижнего паза.

В модели не предусмотрены весьма редко встречающиеся чередующиеся пазы ротора.

3.6. ФУНКЦИИ

Этот параграф является вспомогательным. В нем приведены неоднократно встречающиеся в модели функции.

Основная кривая намагничивания $H = \psi(B)$.

Функция

$$\Phi_0(x) = (x + |x|)/2 \tag{3.1}$$

равна аргументу при положительных его значениях и нулю, если аргумент отрицателен. Эта функция позволяет во многих случаях значительно упростить логическую структуру модели за счет уменьшения числа вариантов формул.

Для приведенных ниже специальных функций предложены аппроксимации, точность которых достаточна для проведения поисковых расчетов. Вычисления по аппроксимациям несколько сокращают время счета и, кроме того, для коэффициентов учета трапецеидальности паза позволяют избежать решения неопределенностей при $x = 1$.

Коэффициенты учета трапецеидальности:

для части паза, не занятой обмоткой,

$$\Phi_{t0}(x) = \frac{\ln x}{x - 1} \approx \frac{2 + 0{,}1\,[\Phi_0(x - 1) + \Phi_0(1/x - 1)]}{1 + x}; \tag{3.2}$$

для взаимной индукции

$$\Phi_{tm}(x) = \frac{2x}{x^2 - 1}\left(\frac{1}{1 - x}\ln x + \frac{1 + x}{2}\right) \approx \frac{x(x + 5)}{1 + 4x + x^2}; \tag{3.3}$$

для самоиндукции

$$\Phi_{tl}(x) = \frac{1{,}5}{1 - x^2}\Phi_{tm}(x) - 0{,}75\frac{x}{1 - x} \approx$$

$$\approx \frac{0{,}75\,x}{1 + x}\left[1 + \frac{2(4 + x)}{1 + 4x + x^2}\right]; \tag{3.4}$$

для части паза, занятой двухслойной обмоткой,

$$\Phi_{tn}(x) = \frac{1 - x^2 + (1 + x^2)\ln\left(\dfrac{2x^2}{1 + x^2}\right)}{\dfrac{3 - x^2}{2} + \dfrac{\ln x^2}{1 - x^2}} \approx \frac{1 + 0{,}8x + 0{,}35x^2}{1 + 1{,}3x + 0{,}57x^2}. \tag{3.5}$$

Апроксимация функции (3.2) применима при $0{,}3 \leqslant x \leqslant 3$, функций (3.3) – (3.5) – при $x \geqslant 0{,}2$.

Формула (3.4) выведена для учета влияния трапецеидальности на рассеяние паза в зоне, занятой обмоткой. В опубликованных ранее методиках этот коэффициент принимался равным 0,75, что соответствует только пазу с параллельными стенками ($x = 1$).

Коэффициент вытеснения тока (функции Эмде):

для активного сопротивления

$$\frac{1}{\varphi(\xi)} = \frac{1}{\xi}\,\frac{\mathrm{ch}\,2\xi - \cos 2\xi}{\mathrm{sh}\,2\xi + \sin 2\xi} \approx \frac{1 + 0{,}32\,\xi^4}{1 + 0{,}114\,\xi^2 + 0{,}32\xi^5}; \tag{3.6}$$

для реактивного сопротивления

$$\lambda(\xi) = \frac{3}{2\xi}\,\frac{\mathrm{sh}\,2\xi - \sin 2\xi}{\mathrm{ch}\,2\xi - \cos 2\xi} \approx \frac{1 + 0{,}25\,\xi^4}{1 + 0{,}111\xi^2 + 0{,}167\xi^5}; \tag{3.7}$$

для взаимного реактивного сопротивления

$$k_{d23}(\xi) = \frac{\mu(\xi)}{\lambda(\xi)} = \frac{2}{3}\left(1 + \frac{\mathrm{ch}\xi\sin\xi - \mathrm{sh}\xi\cos\xi}{\mathrm{ch}\xi\mathrm{sh}\xi - \cos\xi\sin\xi}\right) \approx$$

$$\approx \frac{2}{3}\ \frac{4{,}5 + [\Phi_0(\xi - 1)]^4}{3 + [\Phi_0(\xi - 1)]^4}\ ; \qquad (3.8)$$

для взаимного активного сопротивления

$$k_{\nu 23}(\xi) = \frac{\psi(\xi)}{\varphi(\xi)} = 1 - \frac{\mathrm{ch}\xi\sin\xi + \mathrm{sh}\xi\cos\xi}{\mathrm{ch}\xi\mathrm{sh}\xi + \cos\xi\sin\xi} \approx$$

$$\approx \frac{0{,}08\xi^2 + 0{,}061\xi^4}{1 - 0{,}14\xi^2 + 0{,}0642\xi^4}\,. \qquad (3.9)$$

При $\xi \geqslant 5$ $k_{\nu 23}(\xi) = 1$.

3.7. ВАРЬИРУЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Перечень переменных, вариации которых в процессе поиска предусмотрены моделью электромагнитного расчета АД, включает в себя 16 величин. Однако одновременно варьироваться могут не больше 15 величин. Это соответствует случаю поискового расчета АД с двойной клеткой при независимом варьировании ширины или диаметра клиновой части и дна пазов статора и обеих частей пазов ротора. Для двигателя с простой клеткой наибольшее число варьируемых параметров равно 11, если же, как правило, ширина зубцов (реже – пазов) постоянна, то число параметров уменьшается еще на два. Практически же число варьируемых параметров еще меньше.

Внешний диаметр сердечника обычно задан и не варьируется. Иногда задается внутренний диаметр сердечника. При расчетах электрических модификаций, выполняемых на базе основного исполнения, например АД с повышенным скольжением или АД с повышенным пусковым моментом, варьируются только размеры пазов ротора и индукция в зазоре. При расчетах АД первой длины на базе проектов АД второй длины варьируются только длина сердечника и индукция в зазоре. Иногда при расчетах модификаций, когда мощность АД заранее не оговорена, а все размеры сердечника желательно сохранить, мощность выступает как варьируемая величина (и в то же время обычно и как критерий оптимизации). Поэтому мощность и включена в список варьируемых параметров.

В § 3.1 указывалось, что для варьируемой величины целесообразно задавать ее относительное значение, что при подходящем выборе базы

резко сокращает диапазон изменения данной величины. Это использовано в модели. Внутренний диаметр сердечника задается по отношению к внешнему, ширины пазов – по отношению к зубцовому делению, высоты пазов – по отношению к радиальному размеру сердечника статора. Ширина дна паза задается по отношению к ширине верха. Очевидно, для прямых пазов это отношение не варьируется, а просто задается равным единице. В физических, а не относительных единицах задаются лишь мощность, внешний диаметр и длина сердечника, индукция в зазоре.

Выбор индукции в зазоре в качестве варьируемой величины (вместо, например, числа витков обмотки фазы или числа эффективных проводников в пазу) диктуется также более узкими пределами изменения ее значений.

Все варьируемые величины отмечены в табл. 3.1 курсивом.

3.8. РАЗМЕРЫ ЛИСТОВ СТАТОРА И РОТОРА

В данном параграфе установлены связи, позволяющие при поисковом и поверочном расчетах определить все размеры листов сердечников статора и ротора, необходимые для дальнейшего электромагнитного расчета.

Формулы (3.10), (3.12), (3.19) и им подобные отражают указанную в § 3.3 возможность использовать предлагаемую модель и в случае варьирования, и в случае, когда эти величины заданы заранее и не варьируются. Формула (3.13) позволяет определять ширину шлица как в случае, когда эта величина задана полностью или частично, так и в случае, когда она определяется в зависимости от размеров паза.

Формулой (3.46) ширина шлица нижней клетки связана с шириной дна верхнего паза. Обычно ширина шлица b_{ac3} задается заранее; b_{pc3} при этом принимается равной нулю. Для бутылочных пазов ширина дна верхнего паза b_{g2} одновременно является шириной открытия нижнего паза. В этом случае в (3.46) $b_{pc3} = 1$, а $b_{ac3} = 0$.

Приведенные ниже ограничения, на соответствие которым проверяются размеры при поисковых расчетах (3.14), (3.18), (3.22), (3.27), (3.33), (3.39) и т.д., носят геометрический, конструкторский или технологический характер. Их цель – обеспечить достаточную жесткость конструкции, а также возможность выполнения штампа.

Формулы расчета радиуса дна паза позволяют во многих случаях упростить логическую структуру модели, так как с их помощью удается объединить формулы для расчета размеров пазов с плоским и с полукруглым дном.

Размеры листа статора вычисляют по приведенным ниже формулам.

Внутренний диаметр сердечника, мм,

$$D_{i1} = D_{pi1}D_{a1} + D_{ai1}\,. \qquad (3.10)$$

Зубцовое деление, мм,

$$t_1 = \pi D_{i1}/z_1. \tag{3.11}$$

Ширина или диаметр верха паза, мм,

$$b_{k1} = t_1 b_{pk1} + b_{ak1}. \tag{3.12}$$

Ширина шлица, мм,

$$b_{c1} = b_{ac1} + b_{k1} b_{pc1}. \tag{3.13}$$

Ограничение

$$b_{c1} \leqslant b_{k1}. \tag{3.14}$$

Высота верха паза, мм:
при KO1∨TO1

$$h_{k1} = \sqrt{b_{k1}^2 - b_{c1}^2}/2; \tag{3.15}$$

при KT1

$$h_{k1} = \frac{\alpha_{n1}(b_{k1} - b_{c1})\operatorname{tg}\alpha_{k1}}{2}. \tag{3.15а}$$

Высота паза, мм:
при ¬TO1

$$h_{z1} = h_{pz1}\frac{(D_{a1} - D_{i1})}{2} + h_{az1}; \tag{3.16}$$

при TO1

$$h_{z1} = h_{c1} + h_{k1} + b_{k1}/2. \tag{3.16а}$$

Ширина верха зубца, мм,
при ¬TO1

$$b_{zk1} = t_1[1 + 2(h_{c1} + h_{k1})/D_{i1}] - b_{k1}. \tag{3.17}$$

Ограничение

$$b_{zk1} \geqslant 1 + 0{,}01 D_{a1}. \tag{3.18}$$

Ширина или диаметр дна паза, мм:
при ZS1∨(¬TS1)

$$b_{g1} = b_{pg1} b_{k1} + b_{ag1}; \tag{3.19}$$

при ¬ZS1∧TS1

$$b_{g1} = \frac{t_1[1 + 2(h_{z1} - r_{ag1})/D_{i1}] - b_{zk1}}{1 + \pi r_{pg1}/z_1}. \tag{3.19а}$$

Радиус дна паза, мм,

$$r_{g1} = r_{ag1} + r_{pg1} b_{g1}/2. \tag{3.20}$$

Ширина нижней части зубца, мм:
при ¬ZS1∧TS1

$$b_{zg1} = b_{zk1}; \tag{3.21}$$

при ZS1∨TT1

$$b_{zg1} = t_1[1 + 2(h_{z1} - r_{g1})/D_{i1}] - b_{g1}. \tag{3.21а}$$

Ограничение

$$b_{zg1} \geqslant 1 + 0{,}01 D_{a1}. \tag{3.22}$$

Расчетная ширина зубца при круглом пазе, мм,

$$b_{bz1} = t_1[1 + 2(h_{c1} + h_{k1})/D_{i1}] - b_{k1}(2\sqrt{2}z_1 - \pi)/(3z_1). \tag{3.23}$$

Расчетная высота паза, мм

$$h_{bz1} = h_{z1} - \left(2 - \frac{\pi}{2}\right)\frac{r_{g1}^2}{b_{g1}}. \tag{3.24}$$

Расчетна высота основной части паза, мм,

$$h_{bt1} = h_{bz1} - h_{c1} - h_{k1}. \tag{3.25}$$

Высота спинки, мм,

$$h_{j1} = (D_{a1} - D_{i1})/2 - h_{bz1}. \tag{3.26}$$

Ограничение

$$h_{j1} \geqslant 0{,}055 D_{a1}. \tag{3.27}$$

Высота спинки под канавкой, мм,

$$h_{jf1} = h_{j1} - h_{f1}. \tag{3.28}$$

Размеры листа ротора вычисляют по приведенным ниже формулам.
Внешний диаметр, мм,

$$D_{a2} = D_{i1} - 2\delta. \tag{3.29}$$

Зубцовое деление, мм,

$$t_2 = \pi D_{a2}/z_2. \qquad (3.30)$$

Размеры паза при простой клетке или верхнего паза при двойной клетке определяют следующим образом.

Ширина или диаметр верха паза, мм,

$$b_{k2} = t_2 b_{pk2} + b_{ak2}. \qquad (3.31)$$

Ширина шлица, мм,

$$b_{c2} = b_{ac2} + b_{k2} b_{pc2}. \qquad (3.32)$$

Ограничение

$$b_{c2} \leqslant b_{k2}. \qquad (3.33)$$

Высота верха паза, мм:
при KO2∨TO2

$$h_{k2} = \sqrt{b_{k2}^2 - b_{c2}^2}/2; \qquad (3.34)$$

при KT2

$$h_{k2} = \frac{(b_{k2} - b_{c2})}{2} \operatorname{tg}\alpha_{k2}. \qquad (3.34а)$$

Высота паза, мм:
при ¬TO2

$$h_{z2} = h_{pz2} \frac{(D_{a1} - D_{i1})}{2} + h_{az2}; \qquad (3.35)$$

при TO2

$$h_{z2} = h_b + h_{c2} + h_{k2} + b_{k2}/2. \qquad (3.35а)$$

Ширина верха зубца, мм,
при ¬TO2

$$b_{zk2} = t_2 \left[1 - \frac{2(h_b + h_{c2} + h_{k2})}{D_{a2}}\right] - b_{k2}. \qquad (3.36)$$

Ограничение

$$b_{zk2} \geqslant 1 + 0{,}01 D_{a1}. \qquad (3.37)$$

Ширина или диаметр дна паза, мм:
при ZS2∨(¬TS2)

$$b_{g2} = b_{pg2} b_{k2} + b_{ag2}; \qquad (3.38)$$

при ¬ZS2 ∧ TS2

$$b_{g2} = \frac{t_2[1 - 2(h_{z2} - r_{ag2})/D_{a2}] - b_{zk2}}{1 + \pi r_{pg2}/z_2}. \qquad (3.38а)$$

Ограничения

$$b_{g2} \geqslant 1{,}5; \; b_{g2} \geqslant b_{c3}. \qquad (3.39)$$

Радиус дна паза, мм,

$$r_{g2} = r_{ag2} + b_{g2} r_{pg2}/2. \qquad (3.40)$$

Ширина нижней части зубца, мм:
при ¬ZS2 ∧ TS2

$$b_{zg2} = b_{zk2}; \qquad (3.41)$$

при ZS2 ∨ TT2

$$b_{zg2} = t_2[1 - 2(h_{z2} - r_{g2})/D_{a2}] - b_{g2}. \qquad (3.41а)$$

Ограничение

$$b_{zg2} \geqslant 1 + 0{,}01 D_{a1}. \qquad (3.42)$$

Расчетная ширина зубца при круглом пазе, мм,

$$b_{bz2} = t_2[1 - 2(h_b + h_{c2} + h_{k2})/D_{a2}] - b_{k2}(2\sqrt{2}z_2 + \pi)/(3z_2). \qquad (3.43)$$

Расчетная высота паза, мм,

$$h_{bz2} = h_{z2} - \left(2 - \frac{\pi}{2}\right)\frac{r_{g2}^2}{b_{g2}}. \qquad (3.44)$$

Расчетная высота основной части паза, мм,

$$h_{bt2} = h_{bz2} - h_{c2} - h_{k2} - h_b. \qquad (3.45)$$

Размеры нижнего паза двойной клетки находят по приведенным далее формулам.

Ширина шлица, мм,

$$b_{c3} = b_{pc3} b_{g2} + b_{ac3}. \qquad (3.46)$$

Ширина или диаметр верха паза, мм,

$$b_{k3} = t_2 b_{pk3} + b_{ak3}. \tag{3.47}$$

Ограничение

$$b_{k3} > b_{c3}. \tag{3.48}$$

Высота шлица, мм,

$$h_{c3} = h_{pc3}(D_{a1} - D_{i1})/2 + h_{ac3}. \tag{3.49}$$

Высота верха паза, мм:
при KO3 ∨ TO3

$$h_{k3} = \sqrt{b_{k3}^2 - b_{c3}^2}/2; \tag{3.50}$$

при KT3

$$h_{k3} = \frac{(b_{k3} - b_{c3})}{2} \operatorname{tg} \alpha_{k3}. \tag{3.50a}$$

Высота паза, мм;
при ¬TO3

$$h_{z3} = h_{pz3}(D_{a1} - D_{i1})/2 + h_{az3}; \tag{3.51}$$

при TO3

$$h'_{z3} = h_{c3} + h_{k3} + b_{k3}/2. \tag{3.51a}$$

Ограничение при ¬TO3

$$h_{z3} > h_{c3}. \tag{3.52}$$

Поправка к высоте паза верхней клетки, мм:
при TO2 ∨ DO2

$$h_{g2} = (b_{g2} - \sqrt{b_{g2}^2 - b_{c3}^2})/2; \tag{3.53}$$

при DT2

$$h_{g2} = 0. \tag{3.53a}$$

Ширина верха зубца, мм,
при ¬TO3

$$b_{zk3} = t_2[1 - 2(h_{z2} - h_{g2} + h_{c3} + h_{k3})/D_{a2}] - b_{k3}. \tag{3.54}$$

Ограничение

$$b_{zk3} > 1 + 0{,}01 D_{a1}. \tag{3.55}$$

Ширина или диаметр дна паза, мм;
при ∠S3 ∨ (¬TS3)

$$b_{g3} = b_{pg3} b_{k3} + b_{ag3}; \tag{3.56}$$

при ¬ZS3 ∧ TS3

$$b_{g3} = \frac{t_2[1 - 2(h_{z2} - h_{g2} + h_{z3} - r_{ag3})/D_{a2}] - b_{zk3}}{1 - \pi r_{pg3}/z_2}. \tag{3.56a}$$

Ограничение

$$b_{g3} \geqslant 1{,}5. \tag{3.57}$$

Радиус дна паза, мм,

$$r_{g3} = r_{ag3} + b_{g3} r_{pg3}/2. \tag{3.58}$$

Ширина нижней части зубца, мм:
при ¬ZS3 ∧ TS3

$$b_{zg3} = b_{zk3}; \tag{3.59}$$

при ZS3 ∨ TT3

$$b_{zg3} = t_2[1 - 2(h_{z2} - h_{g2} + h_{z3} - r_{g3})/D_{a2}] - b_{g3}. \tag{3.59a}$$

Ограничение

$$b_{zg3} \geqslant 1 + 0{,}01 D_{a1}. \tag{3.60}$$

Расчетная ширина зубца при круглом пазе, мм,

$$b_{bz3} = t_2[1 - 2(h_{z2} - h_{g2} + h_{c3} + h_{k3})/D_{a2}] -$$

$$- b_{k3}(2\sqrt{2} z_2 + \pi)/(3 z_2). \tag{3.61}$$

Расчетная высота паза, мм,

$$h_{bz3} = h_{z3} - \left(2 - \frac{\pi}{2}\right)\frac{r_{g3}^2}{b_{g3}}. \tag{3.62}$$

Расчетная высота основной части паза, мм,

$$h_{bt3} = h_{bz3} - h_{c3} - h_{k3}. \tag{3.63}$$

Высота спинки, мм:
при ¬В

$$h_{j2} = \frac{D_{a2} - D_{i2}}{2} - h_{bz2} - \frac{2}{3} d_{l2}; \qquad (3.64)$$

при ¬В

$$h_{j2} = \frac{D_{a2} - D_{i2}}{2} - h_{z2} - h_{bz3} - \frac{2}{3} d_{l2}. \qquad (3.64а)$$

Ограничения

$$\left.\begin{aligned} &h_{j2} \geqslant 0{,}02D_{a1} + d_{l2}/3; \\ &h_{j2} + \frac{2}{3} d_{l2} \geqslant 0{,}05D_{a1}. \end{aligned}\right\} \qquad (3.65)$$

3.9. ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ СТАТОРА И РОТОРА

Здесь определяются все размеры и коэффициенты, необходимые для дальнейшего расчета магнитной цепи с учетом вытеснения потока из зубцов в пазы, а также из спинки статора в станину. При этом не учитывается влияние вихревых токов в металле станины, так как при промышленной частоте ими можно пренебречь. Формула (3.73) для k_{j1} при алюминиевой станине выведена для синусоидального распределения магнитного потенциала по окружности сердечника. Остальные формулы выведены из довольно грубой физической модели процесса. Однако они обеспечивают по току намагничивания удовлетворительное совпадение расчетных и опытных данных, в то время как ток, рассчитанный по методикам, в которых, как правило, эффект вытеснения потока не учитывается, существенно больше экспериментального при значительных индукциях в спинке.

Параметры магнитной цепи статора рассчитывают в следующей последовательности.

Коэффициент Картера

$$k_{g1} = 1 + \frac{b_{c1}}{t_1 - b_{c1} + 5t_1\delta/b_{c1}}. \qquad (3.66)$$

Средняя ширина зубца, мм:
при ¬ТО1

$$b_{z1} = (b_{zk1} + b_{zg1})/2; \qquad (3.67)$$

при ТО1

$$b_{z1} = b_{bz1}. \qquad (3.67а)$$

Средняя ширина паза, мм,

$$b_{n1} = (b_{k1} + b_{g1})/2. \qquad (3.68)$$

Коэффициенты индукций в зубце:
при ¬ТО1

$$\left.\begin{aligned} &\varkappa_{zk1} = t_1/(k_j b_{zk1}); \\ &\varkappa_{z1} = t_1/(k_j b_{z1}); \\ &\varkappa_{zg1} = t_1/(k_j b_{zg1}); \end{aligned}\right\} \qquad (3.69)$$

при ТО1

$$\varkappa_{bz1} = t_1/(k_j b_{bz1}). \qquad (3.69а)$$

Коэффициенты индукций в спинке

$$\left.\begin{aligned} &\varkappa_{j1} = D_{i1}/(2p k_j h_{j1}); \\ &\varkappa_{jf1} = D_{i1}/(2p k_j h_{jf1}). \end{aligned}\right\} \qquad (3.70)$$

Длины силовой линии, мм,

$$\left.\begin{aligned} &L_{jf1} = N_{f1} b_{f1}/(4p); \\ &L_{j1} = \pi(D_{a1} - h_{j1})/(4p) - L_{jf1}. \end{aligned}\right\} \qquad (3.71)$$

Коэффициенты рассыщения зубца:
при ¬ТО1

$$\left.\begin{aligned} &k_{zk1} = 0{,}4\pi(1 - k_j + b_{k1}/b_{zk1})/k_j; \\ &k_{z1} = 0{,}4\pi(1 - k_j + b_{n1}/b_{z1})/k_j; \\ &k_{zg1} = 0{,}4\pi(1 - k_j + b_{g1}/b_{zg1})/k_j; \end{aligned}\right\} \qquad (3.72)$$

при ТО1

$$k_{bz1} = 0{,}4\pi[1 - k_j + 2\sqrt{2}b_{k1}/(3b_{bz1})]/k_j. \qquad (3.72а)$$

Коэффициенты рассыщения спинки:
при А

$$k_{j1} = 0{,}4\pi(1 - k_j + 480/h_{j1})/k_j; \qquad (3.73)$$

$$k_{jf1} = 0{,}4\pi[1 - k_j + 240(h_{f1} + 1)/h_{jf1}]/k_j; \qquad (3.73а)$$

при АА

$$k_{j_1} = 0{,}4\pi \left\{ 1 - k_j + \frac{2}{[D_{a1}/(D_{i1} + 2h_{bz1})]^p - [(D_{i1} + 2h_{bz1})/D_{a1}]^p} \right\}. \quad (3.73б)$$

$$k_{jf_1} = 0{,}4\pi \,[1 - k_j + 240 h_{f_1}/h_{jf_1}]/k_j. \quad (3.73в)$$

Параметры магнитной цепи ротора определяют в следующей последовательности.

Коэффициент Картера:

при $h_b = 0$

$$k_{g2} = 1 + \frac{b_{c2}}{t_2 - b_{c2} + 5t_2\delta/b_{c2}}; \quad (3.74)$$

при $h_b > 0$

$$k_{g2} = 1. \quad (3.74а)$$

Простая клетка или верхняя часть двойной клетки характеризуется следующими параметрами.

Средняя ширина зубца, мм:

при ⅂ТО2

$$b_{z2} = (b_{zk2} + b_{zg2})/2; \quad (3.75)$$

при ТО2

$$b_{z2} = b_{bz2}. \quad (3.75а)$$

Средняя ширина паза, мм,

$$b_{n2} = (b_{k2} + b_{g2})/2. \quad (3.76)$$

Коэффициенты индукций в зубце:

при ⅂ТО2

$$\left.\begin{aligned} \varkappa_{zk2} &= \frac{t_2}{k_j b_{zk2}}\left(1 + \frac{2\delta}{D_{a2}}\right); \\ \varkappa_{z2} &= \frac{t_2}{k_j b_{z2}}\left(1 + \frac{2\delta}{D_{a2}}\right); \\ \varkappa_{zg2} &= \frac{t_2}{k_j b_{zg2}}\left(1 + \frac{2\delta}{D_{a2}}\right); \end{aligned}\right\} \quad (3.77)$$

при ТО2

$$\varkappa_{bz2} = \frac{t_2}{k_j b_{bz2}}\left(1 + \frac{2\delta}{D_{a2}}\right). \quad (3.77а)$$

Коэффициенты рассыщения зубца:

при ⅂ТО2

$$\left.\begin{aligned} k_{zk2} &= \frac{0{,}4\pi}{k_j}\left(1 - k_j + \frac{b_{k2}}{b_{zk2}}\right); \\ k_{z2} &= \frac{0{,}4\pi}{k_j}\left(1 - k_j + \frac{b_{n2}}{b_{z2}}\right); \\ k_{zg2} &= \frac{0{,}4\pi}{k_j}\left(1 - k_j + \frac{b_{g2}}{b_{zg2}}\right); \end{aligned}\right\} \quad (3.78)$$

при ТО2

$$k_{bz2} = \frac{0{,}4\pi}{k_j}\left(1 - k_j + \frac{2\sqrt{2}}{3}\,\frac{b_{k2}}{b_{bz2}}\right). \quad (3.78а)$$

Нижняя часть двойной клетки характеризуется следующими параметрами.

Средняя ширина зубца, мм, при ⅂ТО3

$$b_{z3} = \frac{(b_{zk3} + b_{zg3})}{2}. \quad (3.79)$$

Средняя ширина паза, мм,

$$b_{n3} = (b_{k3} + b_{g3})/2. \quad (3.80)$$

Коэффициенты индукций в зубце:

при ⅂ТО3

$$\left.\begin{aligned} \varkappa_{zk3} &= \frac{t_2}{k_j b_{zk3}}\left(1 + \frac{2\delta}{D_{a2}}\right); \\ \varkappa_{z3} &= \frac{t_2}{k_j b_{z3}}\left(1 + \frac{2\delta}{D_{a2}}\right); \\ \varkappa_{zg3} &= \frac{t_2}{k_j b_{zg3}}\left(1 + \frac{2\delta}{D_{a2}}\right); \end{aligned}\right\} \quad (3.81)$$

при ТО3

$$\varkappa_{bz3} = \frac{t_2}{k_j b_{bz3}} \left(1 + \frac{2\delta}{D_{a2}}\right). \qquad (3.81а)$$

Коэффициенты рассыщения зубца:
при ¬ТО3

$$\left.\begin{aligned} k_{zk3} &= \frac{0{,}4\pi}{k_j}\left(1 - k_j + \frac{b_{k3}}{b_{zk3}}\right); \\ k_{z3} &= \frac{0{,}4\pi}{k_j}\left(1 - k_j + \frac{b_{n3}}{b_{z3}}\right); \\ k_{zg3} &= \frac{0{,}4\pi}{k_j}\left(1 - k_j + \frac{b_{g3}}{b_{zg3}}\right); \end{aligned}\right\} \qquad (3.82)$$

при ТО3

$$k_{bz3} = \frac{0{,}4\pi}{k_j}\left(1 - k_j + \frac{2\sqrt{2}}{3}\,\frac{b_{k3}}{b_{bz3}}\right). \qquad (3.82а)$$

Коэффициент индукции в спинке

$$\varkappa_{j2} = D_{i1}/(2p\,k_j\,h_{j2}). \qquad (3.83)$$

3.10. РАСЧЕТЫ ПЛОЩАДЕЙ ПАЗОВ СТАТОРА И РОТОРА

Расчеты площадей сечений пазов статора и ротора, а также площадей пазов статора, занимаемых изоляцией и клином, необходимы при поверочном расчете для определения коэффициентов заполнения паза, а при поисковом – для определения размеров обмоточного провода.

При расчете площадей предусмотрены две возможные формы клина (табл. 3.3): клин в виде изоляционной прокладки (ХК) и обычный клин (ХМ). Для паза с параллельными стенками расположение изоляции в клиновой части соответствует расчетным формулам модели.

При двухслойных обмотках определяется также площадь, занятая прокладкой между слоями; при этом для жестких обмоток предполагается, что между слоями лежат две прокладки, а для всыпных обмоток – что ширина прокладки больше среднеквадратичной ширины паза (соответствующей делению основной трапецеидальной части паза на две равные по площади части) в 1,6 раза.

Расчет площадей пазов статора выполняют в следующей последовательности.

Площадь шлица, мм^2;
при КО1 ∨ ТО1

$$Q_{c1} = h_{c1} b_{c1} - 2b_{c1}(b_{k1}/2 - h_{k1})/3; \qquad (3.84)$$

при КТ1

$$Q_{c1} = h_{c1} b_{c1}. \qquad (3.84а)$$

Площадь верха паза, мм^2;
при КО1 ∨ ТО1

$$Q_{k1} = \pi b_{k1}^2/8; \qquad (3.85)$$

при КТ1

$$Q_{k1} = (b_{c1} + b_{k1})h_{k1}/2. \qquad (3.85а)$$

Площадь основной части паза, мм^2,

$$Q_{t1} = b_{n1} h_{bt1}. \qquad (3.86)$$

Площадь паза в штампе, мм^2,

$$Q_1 = Q_{c1} + Q_{k1} + Q_{t1}. \qquad (3.87)$$

Площадь поперечного сечения клина – крышки (ХК), мм^2:
при КО1 ∨ ТО1

$$S_{k1} = \pi b_{k1}\Delta_{k1}/2; \qquad (3.88)$$

при КТ1

$$S_{k1} = b_{k1}\Delta_{k1}\sqrt{1 + \mathrm{tg}^2\,\alpha_{k1}}. \qquad (3.88а)$$

Площадь поперечного сечения массивного клина (ХМ), мм^2:
при КО1 ∨ ТО1

$$S_{k1} = 1{,}4\Delta_{k1}^2\sqrt{b_{k1}/\Delta_{k1} - 1}; \qquad (3.89)$$

при КТ1

$$S_{k1} = (b_{c1} + \Delta_{k1}/\mathrm{tg}\alpha_{k1})\Delta_{k1}. \qquad (3.89а)$$

Площадь поперечного сечения пазовой изоляции, мм^2:
в верхней части паза:
при ХК ∧(КО1 ∨ ТО1)

$$S_{nk1} = \pi b_{k1}\Delta_{n1}/2; \qquad (3.90)$$

при XK∧KT1

$$S_{nk1} = b_{k1}\Delta_{n1}\sqrt{1+\mathrm{tg}^2\alpha_{k1}}; \qquad (3.90а)$$

при XM

$$S_{nk1} = b_{k1}(2\Delta_{n1} + \Delta_{l1}); \qquad (3.90б)$$

в основной части паза

$$S_{nt1} = (h_{z1} - h_{c1} - h_{k1} - r_{g1})(2\Delta_{n1} + \Delta_{t1}); \qquad (3.91)$$

у дна паза:
при CO1

$$S_{ng1} = [b_{g1} + (\pi - 2)r_{g1}](\Delta_{n1} + \Delta_{t1}); \qquad (3.92)$$

при CS1

$$S_{ng1} = [b_{g1} + (\pi - 2)r_{g1}](\Delta_{n1} + \Delta_{t1} + \Delta_{l1}). \qquad (3.92а)$$

Площадь прокладок, мм^2:
при CO1

$$S_{nl1} = 1{,}6\Delta_{l1}\sqrt{(b_{k1}^2 + b_{g1}^2)/2}\,(N_{s1} - 1); \qquad (3.93)$$

при CS1

$$S_{nl1} = 2\Delta_{l1}b_{n1}(N_{s1} - 1). \qquad (3.93а)$$

Площадь паза, занимаемая изоляцией, мм^2,

$$S_{n1} = S_{nk1} + S_{nt1} + S_{ng1} + S_{nl1}. \qquad (3.94)$$

Площадь паза, занимаемая обмоткой, мм^2,

$$Q_{n1} = Q_1 - S_{k1} - S_{n1} - Q_{c1}. \qquad (3.95)$$

Технологическая площадь паза, мм^2,

$$Q_{tn1} = Q_1 - S_{n1} - Q_{c1}. \qquad (3.96)$$

Площадь паза ротора рассчитывают по приведенным далее формулам.
Паз простой клетки или верхний паз двойной клетки имеет следующие составляющие площади.
Площадь сечения шлица, мм^2,

$$Q_{c2} = h_{c2}b_{c2}, \qquad (3.97)$$

Площадь верха паза, мм^2:

при KO2∨TO2

$$Q_{k2} = \pi b_{k2}^2/8 - 2b_{c2}(b_{k2}/2 - h_{k2})/3; \qquad (3.98)$$

при KT2

$$Q_{k2} = (b_{c2} + b_{k2})/2 - h_{k2}. \qquad (3.98а)$$

Площадь основной части паза, мм^2,

$$Q_{t2} = b_{n2}h_{bt2}. \qquad (3.99)$$

Площадь паза в штампе, мм^2,

$$Q_2 = Q_{c2} + Q_{k2} + Q_{t2}. \qquad (3.100)$$

Площадь дна паза, мм^2,

$$Q_{g2} = r_{g2}[b_{g2} - (2 - \pi/2)r_{g2}]. \qquad (3.101)$$

Паз нижней части двойной клетки имеет следующие составляющие площади сечения.
Площадь шлица, мм^2,

$$Q_{c3} = h_{c3}b_{c3}. \qquad (3.102)$$

Площадь верха паза, мм^2:
при KO3∨TO3

$$Q_{k3} = \pi b_{k3}^2/8 - 2b_{c3}(b_{k3}/2 - h_{k3})/3; \qquad (3.103)$$

при KT3

$$Q_{k3} = (b_{c3} + b_{k3})h_{k3}/2. \qquad (3.103а)$$

Площадь основной части паза, мм^2,

$$Q_{t3} = b_{n3}h_{bt3}. \qquad (3.104)$$

Площадь паза в штампе, мм^2,

$$Q_3 = Q_{c3} + Q_{k3} + Q_{t3}. \qquad (3.105)$$

Общая площадь пазов верхней и нижней клеток в штампе, мм^2,

$$Q = Q_2 + Q_3. \qquad (3.106)$$

Площадь клетки ротора характеризуется площадями стержней и короткозамыкающих колец.

Площадь стержней на плюс, мм^2:
при ┐В

$$Q_q = \frac{z_2}{2p} Q_2; \tag{3.107}$$

при В

$$Q_q = \frac{z_2}{2p} Q. \tag{3.107а}$$

Площадь поперечного сечения короткозамыкающего кольца, мм^2,

$$Q_r = Q_{ar} + Q_{pr} Q_q. \tag{3.108}$$

Средний диаметр короткозамыкающего кольца, мм:
при ┐В

$$D_r = D_{a2} - 1{,}1 h_{bz2}; \tag{3.109}$$

при В

$$D_r = D_{a2} - 1{,}1 (h_{z2} + h_{bz3}). \tag{3.109а}$$

3.11. РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

В этом параграфе определяется ряд параметров и величин, необходимых для дальнейших расчетов. Следует обратить внимание на то, что формулы (3.110) – (3.116), (3.120), (3.121) пригодны только для симметричных обмоток.

Коэффициент рассеяния (3.112) определяет влияние укорочения шага обмотки на рассеяние в шлицевой и верхней частях паза. Напомним, что в общем случае k_y – среднеквадратичное значение сторон полигона Гергеса при условии, что средний объем пазового тока фазы равен единице. Как известно, для двухслойных обмоток при относительном шаге $2/3 \leqslant \beta \leqslant 1$ этот коэффициент равен

$$k_y = (1 + 3\beta_1)/4,$$

а для однослойных обмоток $k_y = 1$. Формула (3.112) позволяет вычислить этот коэффициент для одно-двухслойных, трех- и шестизонных обмоток при любом укорочении шага, а также при удлинении шага до 5/3 диаметрального. Последнее может встретиться при расчете полюсопереключаемых обмоток. При двухслойных обмотках, т.е. при $N_{s1} = 2$, формула (3.112) представляет собой развернутое при помощи функции Φ_0 общее выражение для k_y:

$$k_y = \sin^2 \frac{\pi}{3k_q} \left[\frac{3}{2}\beta_1 k_{q1} + 2 \sum_{i=1}^{E\left(\frac{3}{2}\beta_1 k_{q1}\right)} \left(\frac{3}{2}\beta_1 k_{q1} - i \right) \cos \frac{2\pi}{3k_{q1}} i \right],$$

где E – entier (ближайшее к аргументу меньшее целое число). Формула (3.116) также пригодна для всех видов двухслойных и однослойных диаметральных обмоток.

Индукцию в воздушном зазоре (3.121) определяют при проверочном расчете по заданному числу эффективных проводников в пазу N_{n1}. При поисковом расчете N_{n1} определяют по заданному значению индукции. Отметим, что под индукцией в зазоре в данной модели подразумевается амплитуда основной волны. Как видно из дальнейшего расчета магнитной цепи, это позволяет учитывать уплощение кривой распределения индукции в зазоре практически без итераций.

Линейная нагрузка (3.124) в отличие от общепринятых методик определяется с учетом обмоточного коэффициента.

Потери в стали (3.126) – (3.128) отнесены к номинальной мощности. В (3.126), (3.127) предусмотрено некоторое увеличение этих потерь по сравнению с обычно применяемыми методиками. Так, для спинки вместо коэффициента 1,6, учитывающего влияние обработки, принят коэффициент 2, а для зубцов вместо 1,8–2,1 принято 3. Поэтому в дальнейшем, при систематическом увеличении расчетных значений потерь в стали по сравнению с опытными данными, принятые в методике коэффициенты, возможно, придется скорректировать. Потери в зубцах даны с учетом добавочных потерь холостого хода, которые предполагаются пропорциональными $(k_g - 1)\, 3/2$.

Механические потери в двигателях (3.130) соответствуют только исполнению IP44. При поисковом расчете предполагается обычное соотношение между внешним диаметром сердечника статора и диаметром вентилятора, что не всегда пригодно для поверочного расчета. Поэтому для поверочного расчета следует пользоваться формулой, учитывающей влияние диаметра наружного вентилятора на механические потери.

Расчет выполняют в следующей последовательности.

Число пазов на полюс и фазу

$$q_1 = z_1/(6p). \tag{3.110}$$

Относительный шаг обмотки статора

$$\beta_1 = y_{e1}/(3q_1). \tag{3.111}$$

Коэффициент рассеяния

$$k_y = (2 - N_{s1}) + (N_{s1} - 1) \Big\{ (2 - k_{q1}) \frac{3}{4} [1{,}5\beta_1 - \Phi_0 (1{,}5\beta_1 - 1) -$$

$$- \Phi_0 (1{,}5\beta_1 - 2)] + (k_{q1} - 1) \frac{1}{4} [3\beta_1 + \Phi_0 (3\beta_1 - 1) - \Phi_0 (3\beta_1 - 2) -$$

$$- 2\Phi_0 (3\beta_1 - 3) - \Phi_0 (3\beta_1 - 4)] \Big\}. \qquad (3.112)$$

Параметр для учета скоса пазов

$$\chi = \sqrt{(z_1/z_2)^2 + \beta_x^2}. \qquad (3.113)$$

Число пазов в фазной зоне

$$q_{q1} = N_{s1} q_1 / k_{q1} = c/d, \qquad (3.114)$$

где c/d – несократимая дробь.
Число векторов на фазную зону

$$c_b = (N_{s1} - 1)c + (2 - N_{s1})q. \qquad (3.115)$$

Обмоточный коэффициент

$$k_{w1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3k_{q1}}\right)}{c_b \sin\left(\frac{\pi}{3k_{q1} c_b}\right)} \sin\left(\frac{\pi}{2}\beta_1\right). \qquad (3.116)$$

Коэффициент Картера

$$k_g = k_{g1} k_{g2}. \qquad (3.117)$$

Полюсное деление, мм,

$$\tau = \pi D_{i1} / (2p). \qquad (3.118)$$

Предварительное значение коэффициента рассеяния статора в режиме холостого хода

$$\tau_{v01} = 30\delta / (q_1 \tau). \qquad (3.119)$$

Предварительное значение ЭДС в режиме холостого хода

$$E_{v0} = 1/(1 + \tau_{v01}). \qquad (3.120)$$

Индукция в воздушном зазоре, Тл, при ZN

$$B_{0g} = \frac{3E_{v0} U a_1 \cdot 10^6}{\sqrt{2} N_{n1} f z_1 k_{w1} l_1 \tau}. \qquad (3.121)$$

Расчетное число эффективных проводников в пазу при ˥ZN

$$N_{n1} = \frac{3E_{v0} U a_1 \cdot 10^6}{\sqrt{2} B_{0g} f z_1 k_{w1} l_1 \tau}. \qquad (3.122)$$

Базовый ток, А,

$$I_i = P \cdot 10^3 / (3U). \qquad (3.123)$$

Базовая линейная нагрузка, А/см,

$$A_i = \frac{I_i N_{n1} k_{w1}}{a_1 t_1} 10. \qquad (3.124)$$

Расчетный параметр, Тл · см/А,

$$A_b = B_{0g} \cdot 10^4 / (A_i E_{v0}). \qquad (3.125)$$

Потери в спинке

$$P_{j1} = 0{,}42 p_{10} \left[\frac{L_{j1}}{h_{j1}} + \frac{L_{jf1}}{h_{jf1}} \right] \frac{A_b}{k_j} \sqrt{\frac{f}{50}}\, 10^{-4}. \qquad (3.126)$$

Потери в зубцах

$$P_{z1} = 1{,}05 p_{10} \frac{h_{bz1}}{q_1 b_{z1}} \frac{A_b}{k_j} \sqrt{\frac{f}{50}} [1 + 2(k_g - 1)\sqrt{0{,}1 t_1 (k_g - 1)}] \cdot 10^{-4}. \qquad (3.127)$$

Потери в стали

$$P_{jz1} = P_{j1} + P_{z1}. \qquad (3.128)$$

Синхронная частота вращения, об/мин,

$$n_c = 60f/p. \qquad (3.129)$$

Механические потери

$$P_r = \left[\Phi_0 (2 - p)\, 1{,}3 \left(1 - \frac{D_{a1}}{1000}\right) + \frac{\Phi_0 (p - 1{,}5)}{p - 1{,}5} \right] \times$$

$$\times \frac{1}{p} \left(\frac{n_c}{1000}\right)^2 \left(\frac{D_{a1}}{100}\right)^4 \cdot 10^{-3}. \qquad (3.130)$$

3.12. ИНДУКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РАССЕЯНИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА

Для уточненного расчета магнитной цепи необходимо знание индуктивного и активного сопротивлений обмотки статора. Поэтому определение этих параметров без учета насыщения путей рассеяния предшествует расчету магнитной цепи.

В данной модели рассматриваются пять составляющих поля рассеяния обмотки статора: дифференциальное рассеяние; рассеяние шлицевой части паза; рассеяние верхней (клиновой) части паза; рассеяние основной (заполненной обмоткой) части паза; рассеяние лобовой части обмотки.

Поясним расчет каждой из этих составляющих.

Были проведены подробные исследования дифференциального рассеяния с учетом скоса пазов, открытия пазов и демпфирования полей от высших (и низших – для дробных обмоток) гармонических МДС статора, показавшие необходимость определения коэффициента k_{zx}, который в общем виде может быть представлен как

$$k_{zx} = G_0 k_y - G_1 T_1 - k_w^2 \chi, \qquad (3.131)$$

где χ – по (3.113); $G_0 = 2\chi - k_{nc1}/\chi$, $G_1 = 0$ при $\chi < 1$; $G_0 = 1 + \chi^2 - k_{nc1}$, $G_1 = \dfrac{\chi - 1}{\chi^2}\,[2(\chi - 1)^2 - k_{nc1}]$ при $\chi \geqslant 1$; k_y – по (3.112); k_{nc1} – по (3.132); k_{w1} – по (3.116); T_1 – средний квадрат разностей соседних сторон полигона Гергеса.

Так как значение G_1 при обычных соотношениях чисел пазов статора и ротора мало и $T_1 < 1$, то для упрощения формул можно пренебречь вторым членом (3.131) и в качестве "компенсации" в третьем члене заменить k_{w1}^2 близкой, но большей величиной k_y. Так получены формулы (3.133), (3.133а).

Рассеяние шлицевой части паза (3.135) вычисляется по простой формуле, не нуждающейся в пояснениях. При расчете рассеяния верхней и основной частей паза предполагается, что магнитные силовые линии потока рассеяния в пределах паза перпендикулярны оси паза. В (3.137), (3.139) учтена трапецеидальность паза, о которой было сказано в § 3.6.

Для расчета проводимости рассеяния λ_{s1} необходимо знание длины лобовой части, которая при поисковом расчете определяется по приближенным формулам (3.141), (3.142). Формулу (3.144) можно использовать и при поверочном расчете, когда длина лобовой части известна.

Формула (3.142) для приближенного определения одностороннего вылета лобовой части в дальнейшем в электромагнитном расчете не нужна; она необходима в тепловом расчете, а здесь приведена лишь для ориентации конструктора.

Индуктивность X_1 в формуле (3.146) выражена в относительных единицах. Перевод в абсолютные единицы приведен в § 3.23.

Коэффициент открытия паза

$$k_{nc1} = \Phi_0 \left\{ k_{g1}[1 - 2(\delta/t_1)^2 - \left(1{,}5 - \frac{1}{1 + 0{,}08\, b_{c1}/\delta}\right)(b_{c1}/t_1)^2] - 1 \right\}. \qquad (3.132)$$

Коэффициент для расчета дифференциального рассеяния:

при $\chi < 1$

$$k_{zx} = k_y(2\chi - \chi^2 - k_{nc1}/\chi); \qquad (3.133)$$

при $\chi \geqslant 1$

$$k_{zx} = k_y(1 - k_{nc1}). \qquad (3.133а)$$

Проводимость дифференциального рассеяния

$$\lambda_{z1} = \frac{t_1}{12\,\delta k_g} k_{zx}. \qquad (3.134)$$

Проводимость рассеяния шлица

$$\lambda_{c1} = \frac{h_{c1}}{b_{c1}} k_y. \qquad (3.135)$$

Суммарная толщина клина и изоляции в верхней части паза, мм:

при $CO1 \wedge XK$

$$\Delta_1 = \Delta_{k1} + \Delta_{n1}; \qquad (3.136)$$

при $CO1 \wedge XM$

$$\Delta_1 = \Delta_{k1} + 2\Delta_{n1} + \Delta_{l1}; \qquad (3.136а)$$

при CS1

$$\Delta_1 = \Delta_{k1} + 2\Delta_{n1} + \Delta_{l1} + 0{,}75. \qquad (3.136б)$$

Проводимость рассеяния верха паза:

при $TO1 \vee KO1$

$$\lambda_{k1} = \left[\frac{\pi}{4} - \frac{(h_{k1} - \Delta_1 + 0{,}5\, b_{c1})}{b_{k1}}\right] k_y; \qquad (3.137)$$

4–6983

при КТ1

$$\lambda_{k1} = \left\{ \frac{\Phi_0(\Delta_1 - h_{k1})}{b_{k1}} + \frac{h_{k1}}{b_{k1} + b_{c1}\Phi_0(h_{k1}/\Delta_1 - 1)} \times \right.$$

$$\left. \times\ \Phi_{t0}\left[\frac{b_{c1}}{b_{k1} - (b_{k1} - b_{c1})\Phi_0(1 - \Delta_1/h_{k1})}\right]\right\} k_y. \quad (3.137а)$$

Коэффициент рассеяния в части паза, занятой обмоткой,

$$k_{t1} = 1 - \Phi_{tn}(b_{k1}/b_{g1})(1 - k_y). \quad (3.138)$$

Проводимость рассеяния в части паза, занятой обмоткой:
при СО1

$$\lambda_{t1} = \frac{h_{bt1} - \Delta_{n1} - \Delta_{l1}(N_{s1} - 1) + h_{k1} - \Delta_1}{3b_{k1}} \times$$

$$\times\ \Phi_{tl}(b_{k1}/b_{g1})k_{t1} + \frac{\Delta_{l1}(N_{s1} - 1)}{2\sqrt{2(b_{k1}^2 + b_{g1}^2)}}; \quad (3.139)$$

при CS1

$$\lambda_{t1} = \frac{h_{bt1} - \Delta_{n1} - 2\Delta_{l1}(N_{s1} - 1) - \Delta_{l1} + h_{k1} - \Delta_1}{3b_{n1}} k_{t1} +$$

$$+ \frac{\Delta_{l1}(N_{s1} - 1)}{2b_{n1}}. \quad (3.139а)$$

Средняя ширина катушки, мм,

$$\tau_{w1} = \frac{\pi}{z_1} y_1(D_{i1} + h_{bz1} + h_{c1} + h_{k1}). \quad (3.140)$$

Длина лобовой части обмотки, мм:
при СО1

$$l_{s1} \approx [(1{,}16 + 0{,}14p)\tau_{w1} + 1{,}5 l_{sl1}]\, l_{ps1} + l_{as1}; \quad (3.141)$$

при CS1

$$l_{s1} \approx \left[\frac{\tau_{w1}}{\sqrt{1 - \left(\frac{b_{k1} + \Delta_{s1}}{t_1}\right)^2}} + 2l_{sl1} + h_{bz1}\right] l_{ps1} + l_{as1}. \quad (3.141а)$$

Длина вылета лобовой части обмотки, мм:
при СО1

$$l_{ss1} \approx [\tau_{w1}(0{,}19 + 0{,}1p) + 10]\, l_{pss1} + l_{ass1}; \quad (3.142)$$

при CS1

$$l_{ss1} \approx \left[\frac{b_{k1} + \Delta_{s1}}{2t_1\sqrt{1 - \left(\frac{b_{k1} + \Delta_{s1}}{t_1}\right)^2}}\tau_{w1} + l_{sl1} + \frac{h_{z1}}{2}\right] l_{pss1} + l_{ass1}. \quad (3.142а)$$

Электромагнитный радиус лобовой части обмотки, мм,

$$g_{s1} = 0{,}22\left[\frac{h_{bz1} - \Delta_1 - (N_{s1} - 1)2\Delta_{l1}}{N_{s1}} + b_{n1} - 2\Delta_{n1}\right]. \quad (3.143)$$

Проводимость рассеяния лобовой части

$$\lambda_{s1} = \frac{q_1 l_{s1}}{N_{s1} l_1}\left\{\frac{l_{s1}}{100g_{s1}} \frac{\left(1 - 0{,}5\frac{l_{s1}}{100g_{s1}}\right)}{q_1} + \left(0{,}3 + \frac{y_1}{z_1}\right) \times \right.$$

$$\times \left(0{,}51 + 1{,}11\frac{l_{sl1}}{l_{s1}}\right)\left\{\Phi_0(2 - p)\left[0{,}09 + N_{s1}\left(0{,}535 + \frac{0{,}25}{q_1^2}\right) - \right.\right.$$

$$\left. - \frac{0{,}85}{q_1} - 1{,}26(1 - \beta_1)^2(N_{s1} - 1)\right] + \frac{\Phi_0(p - 1{,}5)}{p - 1{,}5} \times$$

$$\times \left\{0{,}15 + 0{,}31k_{q1}\frac{1}{q_1} + \frac{0{,}26}{q_1^2} - (N_{s1} - 1) \times \right.$$

$$\left.\left.\left. \times\ [(0{,}92k_{q1} + 0{,}76)(0{,}85 + 0{,}05k_{q1} - \beta_1)^2 - 0{,}66]\right\}\right\}\right\}. \quad (3.144)$$

Проводимость рассеяния обмотки статора

$$\lambda_{n1} = \lambda_{z1} + \lambda_{c1} + \lambda_{k1} + \lambda_{t1} + \lambda_{s1}. \quad (3.145)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

$$X_1 = \frac{\pi^2}{3}\frac{0{,}4\sqrt{2}}{A_b q_1}\frac{\lambda_{n1}}{k_{w1}^2}. \quad (3.146)$$

3.13. АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И МАССА ОБМОТКИ СТАТОРА

В этом параграфе по определенным ранее числу проводников в пазу и свободному сечению паза определяются размеры проводников обмотки (при поисковом расчете) или проверяется значение коэффициента заполнения паза (при поверочном расчете). Предполагается, что размеры проводников достаточно малы и для рассматриваемого класса электрических машин влиянием вытеснения тока в обмотке статора можно пренебречь.

Для вычисления радиуса закругления сечения прямоугольной проволоки в модели использована формула (3.160), дающая плавное изменение радиуса в зависимости от высоты проволоки. Скачкообразное изменение радиуса по стандартам неприемлемо для поисковых расчетов. Для поверочных расчетов

$$r_{cu1} = 0{,}5\{h_{cu1} - \Phi_0(h_{cu1} - 1) + 0{,}3[E(0{,}1h_{cu1} + 0{,}835) + E(0{,}1h_{cu1} + 0{,}77)] + 0{,}4[E(0{,}1h_{cu1} + 0{,}635)]\}. \quad (3.147)$$

Здесь функция $E(x)$ означает, как известно, ближайшее к x меньшее целое число.

Размер прямоугольного проводника по ширине паза, мм,

$$b_{cu1} = \frac{b_{n1} - 2\Delta_{n1} - \Delta_{t1} - 0{,}3}{a_{n1}} - 0{,}2 - \Delta_{bc1}. \quad (3.148)$$

Предварительный размер прямоугольного проводника по высоте паза мм,

$$h_{vcu1} = 0{,}6b_{cu1}. \quad (3.149)$$

Предварительное число элементарных проводников в одном эффективном:

при CS1

$$N_{va1} = \frac{h_{z1} - h_{c1} - \Delta_{k1} - 3\Delta_{n1} - \Delta_{t1} - 2N_{s1}(\Delta_{l1} + 0{,}1) - 0{,}65}{(h_{vcu1} + \Delta_{bc1})N_{n1}} a_{n1}; \quad (3.150)$$

при CO1

$$N_{va1} = N_{vga1} - \Phi_0(N_{vga1} - N_{vta1}), \quad (3.150а)$$

где

$$N_{vga1} = \frac{k_{n1}Q_{n1}}{N_{n1}(d_{vcu1} + \Delta_{bc1})^2}; \quad (3.151)$$

$$N_{vta1} = \frac{k_{tn1}Q_{tn1}}{N_{n1}(d_{vcu1} + \Delta_{mc1})^2}. \quad (3.152)$$

Число элементарных проводников в одном эффективном:

при CS1

$$N_{a1} = N_{va1} + \Phi_0(a_{n1} - N_{va1}); \quad (3.153)$$

при CO1

$$N_{a1} = 1 + \Phi_0(N_{va1} - 1). \quad (3.153а)$$

Размер прямоугольного проводника по высоте паза, мм,

$$h_{cu1} = (h_{vcu1} + \Delta_{bc1})\frac{N_{va1}}{a_{n1}} - \Delta_{bc1}. \quad (3.154)$$

Диаметр круглого проводника, мм,

$$d_{cu1} = d_{vcu1} - \Phi_0[d_{vcu1} - d_{gcu1} + \Phi_0(d_{gcu1} - d_{tcu1})], \quad (3.155)$$

где

$$d_{gcu1} = \sqrt{k_{n1}Q_{n1}/N_{n1}} - \Delta_{bc1}; \quad (3.156)$$

$$d_{tcu1} = \sqrt{k_{tn1}Q_{tn1}/N_{n1}} - \Delta_{mc1}. \quad (3.157)$$

Коэффициент заполнения паза:

конструкционный

$$k_{n1} = N_{n1}N_{a1}(d_{cu1} + \Delta_{bc1})^2/Q_{n1}; \quad (3.158)$$

технологический

$$k_{tn1} = N_{n1}N_{a1}(d_{cu1} + \Delta_{mc1})^2/Q_{tn1}. \quad (3.159)$$

Радиус закругления прямоугольной проволоки, мм,

$$r_{cu1} = h_{cu1}/2 - \Phi_0(0{,}34h_{cu1} - 0{,}31) - \Phi_0(0{,}16h_{cu1} - 0{,}69). \quad (3.160)$$

Сечение эффективного проводника, мм^2:

при CS1

$$q_{cu1} = N_{a1}[h_{cu1} b_{cu1} - (4-\pi) r_{cu1}^2]; \quad (3.161)$$

при CO1

$$q_{cu1} = N_{a1} \pi d_{cu1}^2/4. \quad (3.161а)$$

Масса проволоки, кг,

$$m_{w1} = \rho_{c1} N_{n1} z_1 q_{cu1} (l_1 + l_{s1}) 10^{-6}. \quad (3.162)$$

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = \frac{1}{\gamma_{c1}\rho_{c1}} \frac{m_{w1}}{p} \left(\frac{I_i}{a_1 q_{cu1}} \right)^2. \quad (3.163)$$

3.14. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Ниже изложена новая уточненная методика расчета магнитной цепи, пригодная для расчета тока намагничивания при значительных магнитных нагрузках сердечников статора и ротора. Как уже было сказано выше, в ней учтен целый ряд факторов, не рассматриваемых обычно в методиках стран-членов Интерэлектро. Так, в настоящей модели учитывается повышенное насыщение спинки сердечника статора под канавками для крепящих скоб. Впервые предложены формулы для учета рассыщения спинок за счет вытеснения потока в станину и в вал. Известно, что поток в спинке и частично в зубцах статора больше потока в зазоре из-за потоков рассеяния. Это явление учтено в методике коэффициентом потока k_{b1}.

В модели принят основанный на идее Пунга уточненный способ учета уплощения кривой распределения поля в зазоре, заключающийся в определении угловой координаты пересечения уплощенной кривой индукции в зазоре с ее основной волной.

Предложенный в модели способ расчета магнитной цепи позволяет при заданном амплитудном значении основной волны индукции в зазоре отыскать соответствующее магнитное напряжение без итераций. Этот способ в отличие от методик, принятых в ряде стран, не требует применения заранее рассчитанных таблиц намагничивания для зубцов и для спинок. Он исходит из основной кривой намагничивания материала сердечника, учитывающей при необходимости анизотропию стали.

Предварительно вычисляют начальное значение ЭДС

$$E = E_{v0}. \quad (3.164)$$

Начальное значение индукции в воздушном зазоре, Тл,

$$B_g = B_{0g}; \quad (3.165)$$

$$\operatorname{ctg}\varphi = 0. \quad (3.166)$$

Коэффициент потока для статора

$$k_{b1} = 1 + \left(\frac{1}{E} - 1 \right) \left[\frac{\lambda_{z1} + \lambda_{c1} + \lambda_{k1}}{\lambda_{n1}(1 + R_1 \operatorname{ctg}\varphi / X_1)} \right]. \quad (3.167)$$

Магнитное напряжение зазора, А,

$$F_g = \frac{10^3}{0{,}4\pi} \delta k_g B_g. \quad (3.168)$$

Идеальная индукция в зубце статора, Тл, при круглом пазе TO1

$$B_{vbz1} = B_g k_{b1} \varkappa_{bz1}. \quad (3.169)$$

При остальных формах основной части паза статора определяются индукции в зубце B_{vzk1}, B_{vzg1}, B_{vz1} по формулам, аналогичным (3.169), с заменой $\varkappa_{bz1}$ на $\varkappa_{zk1}$, $\varkappa_{zg1}$, $\varkappa_{z1}$ соответственно.

Идеальная индукция в зубце ротора, Тл, при круглом пазе TO2 (одинарная клетка или верхняя часть двойной клетки)

$$B_{vbz2} = B_g \varkappa_{bz2}. \quad (3.170)$$

При остальных формах основной части паза ротора определяются индукции в зубце B_{vzk2}, B_{vz2}, B_{vzg2} по формулам, аналогичным (3.170), с заменой $\varkappa_{bz2}$ на $\varkappa_{zk2}$, $\varkappa_{z2}$, $\varkappa_{zg2}$ соответственно.

Идеальная индукция в зубце ротора, Тл, при круглом пазе TO3 (нижняя часть двойной клетки)

$$B_{vbz3} = B_g \varkappa_{bz3}. \quad (3.171)$$

При остальных формах основной части паза ротора определяются индукции в зубце B_{vzk3}, B_{vz3}, B_{vzg3} по формулам, аналогичным (3.171), с заменой $\varkappa_{bz3}$ на $\varkappa_{zk3}$, $\varkappa_{z3}$, $\varkappa_{zg3}$ соответственно.

Идеальная напряженность поля в зубце статора, А/см:

при ┐TO1

$$H_{vz1} = \frac{\psi(0{,}82 B_{vzk1}) + 4\psi(0{,}82 B_{vz1}) + \psi(0{,}82 B_{vzg1})}{4{,}92}; \quad (3.172)$$

при TO1

$$H_{vz1} = \psi(0{,}82 B_{vbz1})/0{,}82. \quad (3.172а)$$

Идеальная напряженность поля в зубце ротора, А/см:
одинарная клетка или верхняя часть двойной клетки:
при ˥ТО2

$$H_{vz2} = \frac{\psi(0{,}82B_{vzk2}) + 4\psi(0{,}82B_{vz2}) + \psi(0{,}82B_{vzg2})}{4{,}92}; \qquad (3.173)$$

при ТО2

$$H_{vz2} = \psi(0{,}82B_{vbz2})/0{,}82; \qquad (3.173а)$$

нижняя часть двойной клетки:
при ˥ТО3

$$H_{vz3} = \frac{\psi(0{,}82B_{vzk3}) + 4\psi(0{,}82B_{vz3}) + \psi(0{,}82B_{vzg3})}{4{,}92}; \qquad (3.174)$$

при ТО3

$$H_{vz3} = \psi(0{,}82B_{vbz3})/0{,}82. \qquad (3.174а)$$

Идеальное магнитное напряжение в зубцах, А:
при ˥В

$$F_{vz} = 0{,}1(H_{vz1}h_{bz1} + H_{vz2}h_{bz2}); \qquad (3.175)$$

при В

$$F_{vz} = 0{,}1(H_{vz1}h_{bz1} + H_{vz2}h_{bz2} + H_{vz3}h_{bz3}). \qquad (3.175а)$$

Идеальный коэффициент насыщения зубцов

$$k_{vz} = F_{vz}/F_g. \qquad (3.176)$$

Синус угла уплощения:
при $k_{vz} < 0{,}4$

$$\sin\alpha = 0{,}815 + 0{,}009/(0{,}05 + k_{vz}); \qquad (3.177)$$

при $k_{vz} \geqslant 0{,}4$

$$\sin\alpha = 0{,}785 + 0{,}08/(1{,}2 + k_{vz}). \qquad (3.177а)$$

Индукция B_{bz1} в зубце статора при круглом пазе ТО1 определяется из уравнения

$$B_{vbz1} = B_{bz1} + 10^{-4}k_{bz1}\psi(B_{bz1}\sin\alpha)/\sin\alpha. \qquad (3.178)$$

При остальных формах основной части паза статора определяются индукции в зубце B_{zk1}, B_{z1}, B_{zg1} из уравнений, аналогичных (3.178), с заменой B_{vbz1} на B_{vzk1}, B_{vz1}, B_{vzg1} и k_{bz1} на k_{zk1}, k_{z1}, k_{zg1} соответственно.

Индукция B_{bz2}, Тл, в зубце ротора при круглом пазе ТО2 (одинарная клетка или верхняя часть двойной клетки) определяется из уравнения

$$B_{vbz2} = B_{bz2} + 10^{-4}k_{bz2}\psi(B_{bz2}\sin\alpha)/\sin\alpha. \qquad (3.179)$$

При остальных формах основной части паза определяются индукции в зубце B_{zk2}, B_{z2}, B_{zg2} из уравнений, аналогичных (3.179), с заменой B_{vbz2} на $B_{vzk2}, B_{vz2}, B_{vzg2}$ и k_{bz2} на k_{zk2}, k_{z2}, k_{zg2} соответственно.

Индукция B_{bz3}, Тл, в зубце ротора при круглом пазе ТО3 (нижняя часть двойной клетки) определяется из уравнения

$$B_{vbz3} = B_{bz3} + 10^{-4}k_{bz3}\psi(B_{bz3}\sin\alpha)/\sin\alpha. \qquad (3.180)$$

При остальных формах основной части паза определяются индукции в зубце B_{zk3}, B_{z3}, B_{zg3} из уравнений, аналогичных (3.180), с заменой B_{vbz3} на $B_{vzk3}, B_{vz3}, B_{vzg3}$ и k_{bz3} на k_{zk3}, k_{z3}, k_{zg3} соответственно.

Напряженность поля в зубце статора, А/см:
при ˥ТО1

$$H_{z1} = \frac{\psi(B_{zk1}\sin\alpha) + 4\psi(B_{z1}\sin\alpha) + \psi(B_{zg1}\sin\alpha)}{6\sin\alpha}; \qquad (3.181)$$

при ТО1

$$H_{z1} = \psi(B_{bz1}\sin\alpha)/\sin\alpha. \qquad (3.181а)$$

Напряженность поля в зубце ротора, А/см, для одинарной клетки или верхней части двойной клетки:
при ˥ТО2

$$H_{z2} = \frac{\psi(B_{zk2}\sin\alpha) + 4\psi(B_{z2}\sin\alpha) + \psi(B_{zg2}\sin\alpha)}{6\sin\alpha}; \qquad (3.182)$$

при ТО2

$$H_{z2} = \psi(B_{bz2}\sin\alpha)/\sin\alpha. \qquad (3.182а)$$

То же для нижней части двойной клетки:
при ˥ТО3

$$H_{z3} = \frac{\psi(B_{zk3}\sin\alpha) + 4\psi(B_{z3}\sin\alpha) + \psi(B_{zg3}\sin\alpha)}{6\sin\alpha}; \qquad (3.183)$$

при ТОЗ

$$H_{z3} = \psi(B_{bz3} \sin\alpha)/\sin\alpha. \quad (3.183а)$$

Магнитное напряжение зубцов, А:
при ¬В

$$F_z = 0{,}1(H_{z1}h_{bz1} + H_{z2}h_{bz2}); \quad (3.184)$$

при В

$$F_z = 0{,}1(H_{z1}h_{bz1} + H_{z2}h_{bz2} + H_{z3}h_{bz3}). \quad (3.184а)$$

Коэффициент насыщения зубцов

$$k_z = F_z/F_g. \quad (3.185)$$

Расчетные параметры k_{j1i} для спинки статора:

$$\left.\begin{aligned}
k_{j11} &= 1 + \frac{0{,}13k_z + 0{,}0005k_z^2}{1 + 0{,}54k_z + 0{,}01k_z^2};\\
k_{j12} &= 1 + \frac{0{,}13k_z + 0{,}0034k_z^2}{1 + 1{,}333k_z + 0{,}111k_z^2};\\
k_{j13} &= 1 - \frac{0{,}025k_z}{1 + 0{,}36k_z + 0{,}009k_z^2};\\
k_{j14} &= 1 - \frac{0{,}2k_z}{1 + 1{,}5k_z + 0{,}0156k_z^2};\\
k_{j15} &= 1 - \frac{0{,}333k_z}{1 + 1{,}75k_z + 0{,}0156k_z^2};\\
k_{j16} &= 1 - \frac{0{,}5k_z}{1 + 2{,}3k_z + 0{,}0156k_z^2}.
\end{aligned}\right\} \quad (3.186)$$

Индукции B_{j1i}, Тл, в спинке статора определяются из уравнений вида

$$B_{j1i} + 10^{-4}k_{j1}\psi(B_{j1i}) = \varkappa_{j1}k_{b1}B_g k_{j1i} \sin\frac{\pi}{12}(7-i),$$

где $i = 1, 2, \ldots 6$;

$$B_{jf1} + 10^{-4}k_{jf1}\psi(B_{jf1}) = \varkappa_{jf1}k_{b1}B_g. \quad (3.187)$$

Напряженность поля в спинке статора, А/см,

$$\left.\begin{aligned}
H_{j1} &= \frac{\psi(B_{j11}) + 4\psi(B_{j12}) + 2\psi(B_{j13}) + 4\psi(B_{j14}) +}{18}\\
&\rightarrow \frac{+ 2\psi(B_{j15}) + 4\psi(B_{j16})}{};\\
H_{jf1} &= \psi(B_{jf1}).
\end{aligned}\right\} \quad (3.188)$$

Идеальная индукция в спинке ротора, Тл,

$$B_{vj2} = B_g\varkappa_{j2}. \quad (3.189)$$

Расчетный параметр:
при WM

$$\epsilon = \frac{\Phi_0(p-1{,}5)}{p-1{,}5}[0{,}9 - \Phi_0(0{,}615B_{vj2} - 0{,}8)] + $$

$$+ \frac{\Phi_0(1{,}5-p)}{1{,}5-p}(0{,}6 - 0{,}1B_{vj2}); \quad (3.190)$$

при ¬WM

$$\epsilon = 1.$$

Индукция в спинке ротора, Тл,

$$B_{j2} = B_{vj2}\left[1 - \frac{(1 + 2h_{j2}/D_{i2})^p(1-\epsilon)}{(1 + 2h_{j2}/D_{i2})^{2p} - \epsilon}\right]. \quad (3.191)$$

Длина силовой линии в спинке ротора, мм,

$$L_{j2} = h_{j2}\left[\frac{(1 + 2h_{j2}/D_{i2})^p}{(1 + 2h_{j2}/D_{i2})^p - 1} - \frac{\epsilon}{(1 + 2h_{j2}/D_{i2})^p + \epsilon}\right]. \quad (3.192)$$

Напряженность поля в спинке ротора, А/см,

$$H_{j2} = \psi(B_{j2}). \quad (3.193)$$

МДС обмотки статора, А,

$$F = F_g + F_z + 0{,}1(H_{j1}L_{j1} + H_{jf1}L_{jf1} + H_{j2}L_{j2}). \quad (3.194)$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи

$$k_{mg} = F/F_g. \qquad (3.195)$$

Расчетный воздушный зазор, мм,

$$\delta_b = \delta k_g k_{mg}. \qquad (3.196)$$

3.15. ИНДУКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РАССЕЯНИЯ ОБМОТКИ РОТОРА

Ниже приведены формулы для расчета коэффициентов проводимостей и индуктивных сопротивлений рассеяния простой и двойной клеток ротора. К пяти составляющим рассеяния обмотки статора (см. § 3.12) добавляются еще рассеяние скоса, а для закрытых пазов ротора – рассеяние мостика. В этой модели применена схема замещения, в которой цепь взаимной индукции представлена полной индуктивностью обмотки статора, соответствующей основной волне поля в зазоре, а не взаимной индуктивностью обмоток статора и ротора.

При таком подходе скос пазов учитывается, во-первых, при расчете приведенных значений токов и сопротивлений обмотки ротора, а во-вторых, путем введения в цепь ротора индуктивности рассеяния скоса. Теоретическое значение λ_x определяется формулой

$$\lambda_x = \frac{t_2 \beta_x^2}{12\delta_b}\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2. \qquad (3.197)$$

Однако расчетные значения индуктивности рассеяния для машин со скосом пазов несколько больше экспериментальных. По-видимому, это объясняется тем, что при теоретическом выводе не учитывается значительное насыщение зубцов под одним из краев АД. Для некоторой коррекции указанной систематической погрешности проводимость рассеяния скоса уменьшена в модели до 3/4 теоретического значения.

Что касается проводимости потока рассеяния через мостик для закрытых пазов ротора, то она представляется в виде суммы двух членов; одного – постоянного (3.201), не зависящего от тока, и второго – обратно пропорционального току в пазу ротора (3.202).

Насыщение путей рассеяния и вытеснение тока в стержнях ротора в настоящем параграфе не учтены, т.е. реактивные сопротивления относятся к режимам малых частот в роторе и относительно малых токов, в том числе к номинальному режиму. Это касается и формулы (3.224) для двойной клетки, соответствующей равномерному распределению плотности тока по всему сечению двойного паза.

Коэффициент открытия паза

$$k_{nc2} = \Phi_0\left\{ k_{g2}\left[1 - 2\left(\frac{\delta}{t_2}\right)^2 - \left(1{,}5 - \frac{1}{1 + 0{,}08\dfrac{b_{c2}}{\delta}}\right)\left(\frac{b_{c2}}{t_2}\right)^2\right] - 1\right\}. \qquad (3.198)$$

Проводимость дифференциального рассеяния

$$\lambda_{z2} = \frac{t_2}{12\delta k_g}(1 - k_{nc2}). \qquad (3.199)$$

Проводимость рассеяния скоса пазов

$$\lambda_x = \frac{t_2 \beta_x^2}{16\delta_b}\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2. \qquad (3.200)$$

Проводимость мостика, не зависящая от тока,

$$\lambda_b = \frac{h_b}{b_{c2} + \Phi_0(0{,}5 b_{k2} - b_{c2})}. \qquad (3.201)$$

Проводимость мостика, зависящая от тока,

$$\lambda_{bi} = h_b/\delta_e, \qquad (3.202)$$

где δ_e – эквивалентный зазор насыщения, мм:

$$\delta_e = 1{,}416\delta z_1/z_2. \qquad (3.203)$$

Проводимость шлица:
при $h_{c2} > 0$

$$\lambda_{c2} = h_{c2}/b_{c2}; \qquad (3.204)$$

при $h_{c2} = 0$

$$\lambda_{c2} = 0. \qquad (3.204а)$$

Проводимость рассеяния колец

$$\lambda_r = \frac{D_r z_2}{4\pi^2 p^2 l_1}\left[\frac{\nu_r - 5}{\nu_r + 5}(1{,}9 + 0{,}02\nu_r) + 1{,}61\right], \qquad (3.205)$$

где ν_r – расчетный параметр, равный:
при ¬В

$$\nu_r = \frac{4{,}7 D_r}{h_{bz2} + 2Q_r/h_{bz2}}; \qquad (3.206)$$

при В

$$\nu_r = \frac{4{,}7 D_r}{h_{z2} + h_{bz3} + 2Q_r/(h_{z2} + h_{bz3})}. \qquad (3.206а)$$

Проводимость рассеяния верха паза:
при КО2 ∨ ТО2

$$\lambda_{k2} = \frac{1}{Q_2^2}\left[\left(\frac{\pi}{12} + \frac{5}{8\pi}\right)Q_{k2}^2 + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{\pi}\right)Q_{k2}Q_{t2} + \frac{\pi}{4}Q_{t2}^2\right] - \frac{b_{c2}}{2b_{k2}}; \qquad (3.207)$$

при КТ2

$$\lambda_{k2} = \frac{1}{Q_2^2}\left[\frac{1}{3}Q_{k2}^2 \Phi_{tl}\left(\frac{b_{bc2}}{b_{k2}}\right) + Q_{k2}Q_{t2}\Phi_{tm}\left(\frac{b_{bc2}}{b_{k2}}\right) + \right.$$

$$\left. + Q_{t2}^2 \Phi_{t0}\left(\frac{b_{bc2}}{b_{k2}}\right)\right]\frac{h_{k2}}{b_{bc2}}, \qquad (3.207а)$$

где b_{bc2} – расчетная ширина шлица, равная при $h_{c2} > 0$

$$b_{bc2} = b_{c2} + \Phi_0 (b_{k2}/3 - b_{c2}); \qquad (3.208)$$

при $h_{c2} = 0$

$$b_{bc2} = b_{k2}\left[\frac{1}{5\,\mathrm{tg}\,\alpha_{k2}} - \Phi_0\left(\frac{1}{5\,\mathrm{tg}\,\alpha_{k2}} - 1\right)\right]. \qquad (3.209)$$

Проводимость рассеяния основной части паза

$$\lambda_{t2} = \frac{h_{bt2}}{3b_{k2}}\Phi_{tl}\left(\frac{b_{k2}}{b_{g2}}\right). \qquad (3.210)$$

Проводимость рассеяния нижней клетки по пазу верхней клетки (ротор с двойной клеткой):
верх:
при КО2

$$\lambda_{kn3} = \frac{\pi}{4} - \frac{b_{c2}}{2b_{k2}}; \qquad (3.211)$$

при КТ2

$$\lambda_{kn3} = \frac{h_{k2}}{b_{k2}}\Phi_{t0}\left(\frac{b_{bc2}}{b_{k2}}\right); \qquad (3.211а)$$

основная часть:
при ¬ТО2

$$\lambda_{tn3} = \frac{h_{z2} - h_{c2} - h_{k2} - h_b - r_{g2}}{b_{k2}}\Phi_{t0}\left(\frac{b_{g2}}{b_{k2}}\right); \qquad (3.212)$$

при ТО2

$$\lambda_{tn3} = \frac{\pi}{2} - \frac{b_{c2} + b_{c3}}{2b_{k2}}; \qquad (3.212а)$$

дно при ¬ТО2

$$\lambda_{gn3} = \left(\frac{\pi}{4} - \frac{b_{c3}}{2b_{g2}}\right)\frac{2r_{g2}}{b_{g2}}; \qquad (3.213)$$

суммарная проводимость:
при ¬ТО2

$$\lambda_{n3} = \lambda_{kn3} + \lambda_{tn3} + \lambda_{gn3}; \qquad (3.214)$$

при ТО2

$$\lambda_{n3} = \lambda_{tn3}. \qquad (3.214а)$$

Проводимость рассеяния взаимной индукции по пазу верхней клетки:
верх:
при КО2

$$\lambda_{k23} = \frac{\pi}{8} + \frac{1}{2\pi} - \frac{b_{c2}}{2b_{k2}}; \qquad (3.215)$$

при КТ2

$$\lambda_{k23} = \frac{h_{k2}}{2b_{bc2}} \Phi_{tm}\left(\frac{b_{bc2}}{b_{k2}}\right); \tag{3.215a}$$

основная часть:
при $\neg$TO2

$$\lambda_{t23} = \frac{h_{z2} - h_{c2} - h_{k2} - h_b - r_{g2}}{2b_{k2}} \Phi_{tm}\left(\frac{b_{k2}}{b_{g2}}\right); \tag{3.216}$$

при ТО2

$$\lambda_{t23} = \pi/4 - b_{c2}/(2b_{k2}); \tag{3.216a}$$

дно при$\neg$TO2

$$\lambda_{g23} = \left(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{\pi}\right)\frac{r_{g2}}{b_{g2}}; \tag{3.217}$$

суммарная проводимость:
при $\neg$TO2

$$\lambda_{23} = \frac{1}{Q_2}(\lambda_{kn3}Q_{t2} + \lambda_{k23}Q_{k2} + \lambda_{tn3}Q_{g2} +$$

$$+ \lambda_{t23}(Q_{t2} - Q_{g2}) + \lambda_{g23}Q_{g2}); \tag{3.218}$$

при ТО2

$$\lambda_{23} = Q_{t2}\lambda_{t23}/Q_2. \tag{3.218a}$$

Проводимость рассеяния паза нижней клетки:
шлиц

$$\lambda_{c3} = h_{c3}/b_{c3}; \tag{3.219}$$

верх:
при КО3 $\vee$ТО3

$$\lambda_{k3} = \frac{1}{Q_3^2}\left[\left(\frac{\pi}{12} + \frac{5}{8\pi}\right)Q_{k3}^2 + \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{\pi}\right)Q_{k3}Q_{t3} +\right.$$

$$\left. + \frac{\pi}{4}Q_{t3}^2\right] - \frac{b_{c3}}{2b_{k3}}; \tag{3.220}$$

при КТ3

$$\lambda_{k3} = \frac{1}{Q_3^2}\left[\frac{1}{3}Q_{k3}^2\Phi_{tl}\left(\frac{b_{c3}}{b_{k3}}\right) + Q_{k3}Q_{t3}\Phi_{tm}\left(\frac{b_{c3}}{b_{k3}}\right) +\right.$$

$$\left. + Q_{t3}^2\Phi_{t0}\left(\frac{b_{k3}}{b_{c3}}\right)\right]\frac{h_{k3}}{b_{c3}}; \tag{3.220a}$$

основная часть

$$\lambda_{t3} = \frac{b_{bt3}}{3b_{k3}}\Phi_{tl}\left(\frac{b_{k3}}{b_{g3}}\right). \tag{3.221}$$

Суммарная проводимость рассеяния нижней клетки

$$\lambda_3 = \lambda_{c3} + \lambda_{k3} + \lambda_{t3} + \lambda_{n3} - \lambda_{23}. \tag{3.222}$$

Общая проводимость рассеяния взаимной индукции

$$\lambda_{n23} = \lambda_{23} + \lambda_{z2} + \lambda_x + \lambda_b + \lambda_{c2} + \lambda_r. \tag{3.223}$$

Проводимость рассеяния ротора, не зависящая от тока:
при $\neg$B

$$\lambda_{n2} = \lambda_{z2} + \lambda_x + \lambda_b + \lambda_{c2} + \lambda_{k2} + \lambda_{t2} + \lambda_r; \tag{3.224}$$

при В

$$\lambda_{n2} = \lambda_{n23} + \lambda_3(Q_3/Q)^2. \tag{3.224a}$$

Проводимость рассеяния ротора, зависящая от тока,

$$\lambda_{ni2} = \lambda_{bi}. \tag{3.225}$$

Квадрат коэффициента скоса пазов

$$k_x = 1 - (\pi p \beta_x/z_1)^2/3. \tag{3.226}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния ротора, не зависящее от тока,

$$X_2 = X_1 \frac{\lambda_{n2}}{\lambda_{n1}} \frac{k_{wi}^2}{k_x} \frac{z_1}{z_2}. \tag{3.227}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния ротора, зависящее от тока,

$$X_{i2} = X_2\lambda_{ni2}/\lambda_{n2}. \tag{3.228}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния нижней клетки

$$X_3 = X_2 \frac{\lambda_3}{\lambda_{n2}} . \qquad (3.229)$$

3.16 АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И МАССА ОБМОТКИ РОТОРА

Сопротивление стержня

$$R_c = \frac{\sqrt{2}}{k_x} \frac{10^4}{A_b Q_q \gamma_{c2}} \frac{50}{f} . \qquad (3.230)$$

Сопротивление кольца

$$R_r = R_c \frac{Q_q}{Q_r} \frac{D_r}{\pi l_1 p} . \qquad (3.231)$$

Активное сопротивление обмотки ротора

$$R_2 = R_c + R_r . \qquad (3.232)$$

Сопротивление верхнего стержня двойной клетки

$$R_{c2} = R_c Q/Q_2 . \qquad (3.233)$$

Сопротивление нижнего стержня двойной клетки

$$R_{c3} = R_c Q/Q_3 . \qquad (3.234)$$

Масса обмотки, кг,

$$m_{w2} = \rho_{c2} 10^{-6} (2p Q_q l_1 + Q_r \cdot 1{,}45 \cdot 2\pi D_r) . \qquad (3.235)$$

3.17. НОМИНАЛЬНЫЙ РЕЖИМ

Ниже приведены формулы для определения выходных данных (тока, скольжения, энергетических показателей) АД при номинальной, а также при любой другой полезной мощности, определяемой коэффициентом загрузки. Для большинства АД средней мощности при промышленной частоте падение напряжения в обмотке статора при номинальном режиме относительно невелико и при расчете номинального режима магнитная цепь может не пересчитываться. Однако для использования модели для расчета современных, весьма насыщенных АД с относительно большим сопротивлением обмотки статора, например двигателей малой мощности, тихоходных двигателей, а также для расчета частотно-управляемых двигателей при низких частотах в модели предлагается предварительно определить ЭДС и соответственно пересчитать параметры магнитной цепи.

В модели использован способ непосредственного расчета выходных данных АД при заданной полезной мощности, не требующий подбора и дальнейшей проверки скольжения. Этот способ основан на использовании Г-образной схемы замещения с вынесенной на выводы цепью потерь в стали. Таким образом, потери в стали предполагаются неизменными, не зависящими от мощности на валу АД.

Исходными для расчета параметров АД при заданной мощности на валу являются механические потери, включающие потери на трение, и добавочные потери при нагрузке. В модели принято, что добавочные потери равны 0,5% забираемой мощности.

Как уже отмечалось, при расчете номинального режима предполагается, что скольжение относительно мало и токи невелики. Поэтому расчет выполняется для не зависящих от частоты и тока параметров обмоток. Однако при закрытом пазе ротора следует принять во внимание составляющую индуктивного сопротивления рассеяния ротора, обратно пропорциональную току. В связи с этим для расчета тока ротора, соответствующего механической мощности, приходится решать уравнение четвертой степени. Это уравнение легко выводится из выражения для рабочего тока Г-образной схемы при $U = 1$:

$$I_2 = \frac{1}{\sqrt{(R_1 + R_2 k_{n2}/s_n)^2 + (X_k + X_{i2} k_{n2} I_{s1}/I_2)^2}} . \qquad (3.236)$$

Но, поскольку механическая мощность $P_i = I_2^2 R_2 k_{n2}(1/s_n - 1)$, получим

$$1 = \sqrt{(I_2 R_2 + P_i/I_2)^2 + (I_2 X_k + I_{s1} k_{n2} X_{i2})^2} . \qquad (3.237)$$

Предлагается следующий способ решения этого уравнения: обозначим

$$I_{s1} k_{n2} X_{i2} = E_s ; \quad \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = Z_k ;$$

$$(1 - E_s^2)/(2P_i) - R_k = R_n ,$$

тогда первое приближение для расчетного тока (являющееся решением при $E_s = 0$, т.е. для полузакрытых пазов ротора)

$$I_{21} = \sqrt{\frac{P_i}{R_n + \sqrt{R_n^2 - Z_n^2}}} . \qquad (3.238)$$

Следующее, практически достаточное во всех случаях приближение можно найти разложением (3.237) в ряд Тейлора с учетом первой и второй производных. Введем обозначения:

$$A = X_k I_{21} E_s;\ B = P_i R_n - I_{21}^2 Z_k^2 - 1{,}5A;$$

$$C = 2I_{21}^2 Z_k^2 + 1{,}5A.$$

Тогда

$$I_2 = I_{21} \sqrt{1 + \frac{2A}{B + \sqrt{B^2 - AC}}}\,. \tag{3.239}$$

Можно легко убедиться, что для любого практически возможного сочетания параметров подстановка вычисленного по предлагаемому способу значения I_2 в уравнение (3.254) приводит к равенству правой и левой частей.

Ток потерь в стали не принимался во внимание при расчете двигателя по Г-образной схеме замещения при заданной механической мощности и определении падения напряжения в обмотке статора. Предлагается добавлять ток потерь к рассчитанной без его учета активной составляющей тока статора. Это приводит к небольшой погрешности, несущественной для ручного счета, но неприемлемой при счете на ЭВМ. В модели активная составляющая тока статора определяется исходя из расчетной мощности, включающей все потери, в том числе и от реактивной составляющей тока статора. Действительно, при напряжении $U = 1$ имеем (в относительных единицах)

$$I_{a1} = P_b + 0{,}05 I_{a1} + I_{a1}^2 R_1,$$

откуда получаем решение (3.261), в котором радикал перенесен в знаменатель, чтобы избежать вычисления разности двух близких по значению величин.

Коэффициент загрузки двигателя по мощности

$$\zeta = 1.$$

Предварительное значение тока статора

$$I_{vn1} = \zeta / (\cos\varphi_v \eta_v)\,. \tag{3.240}$$

Предварительное значение ЭДС при нагрузке

$$E_{vn} = \sqrt{(\cos\varphi_v - I_{vn1} R_1)^2 + (\sin\varphi_v - I_{vn1} X_1)^2}\,. \tag{3.241}$$

Индукция в воздушном зазоре при нагрузке, Тл,

$$B_{ng} = B_{0g} E_{vn} / E_{v0}\,. \tag{3.242}$$

Входные величины для расчета магнитной цепи:
ЭДС, В,

$$E = E_{vn}; \tag{3.243}$$

индукция в воздушном зазоре, Тл,

$$\left.\begin{aligned} B_g &= B_{ng};\\ \operatorname{ctg}\varphi &= \operatorname{ctg}\varphi_v\,. \end{aligned}\right\} \tag{3.244}$$

Расчет магнитной цепи выполняется, как указано в § 3.14. Индуктивное сопротивление главного поля при нагрузке

$$X_n = 0{,}4\sqrt{2}\,\frac{\tau}{\delta_b A_b}\,. \tag{3.245}$$

Коэффициент рассеяния статора при нагрузке

$$\tau_{n1} = X_1 / X_n\,. \tag{3.246}$$

Коэффициент сопротивления при нагрузке

$$k_n = R_1 / (X_1 + X_n)\,. \tag{3.247}$$

Коэффициент приведения параметров Т-образной схемы замещения к Г-образной

$$k_{n2} = (1 + \tau_{n1})^2 (1 + k_n^2)\,. \tag{3.248}$$

Коэффициент индуктивного сопротивления статора

$$k_{nx1} = (1 + \tau_{n1})(1 + k_n R_1 / X_1)\,. \tag{3.249}$$

Ток насыщения статора

$$I_{s1} = \frac{1700\,\delta_{a1} E_{vn}}{\sqrt{2 k_y}\, N_{n1} I_i} \left[1 - \frac{1}{3}\chi^2 \left(\frac{\pi p}{z_1}\right)^2 \right]. \tag{3.250}$$

Активное сопротивление короткого замыкания

$$R_k = R_1 + R_2 k_{n2}\,. \tag{3.251}$$

Составляющая индуктивного сопротивления короткого замыкания, не зависящая от тока,

$$X_k = X_1 k_{nx1} + X_2 k_{n2}\,. \tag{3.252}$$

Механическая мощность

$$P_i = \zeta(1 + 0{,}005/\eta_v) + P_r. \qquad (3.253)$$

Для нахождения P_i надо решить уравнение

$$P_i = I_2\sqrt{1 - (I_2 X_k + I_{s1} k_{n2} X_{i2})^2} - I_2^2 R_k \qquad (3.254)$$

и принять I_2 равным наименьшему положительному корню.

Расчетное реактивное сопротивление короткого замыкания

$$X_{bk} = X_k + X_{i2} k_{n2} \frac{I_{s1}}{I_2}. \qquad (3.255)$$

Эквивалентное сопротивление нагрузки

$$R_e = P_i/I_2^2. \qquad (3.256)$$

Реактивная составляющая намагничивающего тока

$$I_{0r} = \frac{1}{X_n(1 + \tau_{n1})(1 + k_n^2)}. \qquad (3.257)$$

Реактивная составляющая тока статора

$$I_{r1} = I_{0r} + I_2^2\left[\frac{X_{bk}(1 - k_n^2) - (R_e + R_k)\,2k_n}{1 + k_n^2}\right]. \qquad (3.258)$$

Потери в обмотке ротора

$$P_{c2} = I_2^2 R_2 k_{n2}. \qquad (3.259)$$

Расчетная мощность

$$P_b = \zeta + P_r + P_{jz1} + P_{c2} + I_{r1}^2 R_1. \qquad (3.260)$$

Активная составляющая тока статора

$$I_{a1} = \frac{P_b}{0{,}995/2 + \sqrt{(0{,}995/2)^2 - P_b R_1}}. \qquad (3.261)$$

Ток статора

$$I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{r1}^2}. \qquad (3.262)$$

Линейная нагрузка

$$A = A_i I_1/k_{w1}. \qquad (3.263)$$

Потери в обмотке статора

$$P_{c1} = I_1^2 R_1. \qquad (3.264)$$

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi_n = I_{a1}/I_1. \qquad (3.265)$$

ЭДС в рабочем режиме

$$E_n = \sqrt{(\cos\varphi_n - I_1 R_1)^2 + (\sin\varphi_n - I_1 X_1)^2}. \qquad (3.266)$$

Если $|1 - E_n/E_{vn}|(k_{mg} - 1) \geqslant 0{,}01$, то следует принять $E_{vn} = E_n + (E_{vn} - E_n)/3$ и провести расчет магнитной цепи по § 3.14 [(3.245) – (3.266)].

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \zeta/I_{a1}. \qquad (3.267)$$

Скольжение

$$s_n = \frac{1}{1 + R_e/(R_2 k_{n2})}. \qquad (3.268)$$

Частота вращения ротора, об/мин,

$$n_n = n_c(1 - s_n). \qquad (3.269)$$

3.18. РАСЧЕТ ИНДУКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ РАССЕЯНИЯ СТАТОРА И РОТОРА С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ

Для расчета пускового режима и максимального момента современных высокоиспользованных АД должна быть учтена зависимость индуктивных сопротивлений рассеяния от тока.

Физическая картина полей рассеяния весьма сложна. Предложенный в данной модели способ расчета основан на представлении реактивностей рассеяния статора и ротора в виде двух составляющих, одна из которых не зависит от тока, а другая обратно пропорциональна току. Такой подход хорошо отражает зависимости, полученные экспериментально. Учитываются два этапа насыщения, один из которых определяется граничным значением тока в обмотке статора, другой – граничным значением тока в обмотке ротора. Определение этих значений основано на работе Вепплера. Однако весьма сложная, требующая многочисленных

последовательных итераций и поэтому неприемлемая для поисковых расчетов методика Вепплера значительно упрощена и переделана.

Предлагаемая модель относительно проста и требует практически не больше одного повторного расчета, если окажется, что значение тока меньше граничного тока статора или ротора (или и того, и другого). В то же время, как показали расчеты, предлагаемая модель позволяет добиться вполне приемлемых соотношений между расчетными и опытными данными.

Расчет выполняют в следующей последовательности.

Ток насыщения ротора

$$I_{s2} = I_{s1} b_{c2} / \delta_e. \tag{3.270}$$

Коэффициенты насыщения

$$\left.\begin{aligned} & k_s = \frac{1}{1 + (t_1 + t_2)/(2\delta)}; \; k_{sz} = 0{,}1 + 0{,}9 k_s; \; k_{sc} = \frac{(1+k_s)}{2}; \\ & k_{sk1} = k_{sc} + (1 - k_{sc}) \frac{9 b_{c1}}{19 b_{c1} + b_{k1}}; \\ & k_{sk2} = k_{sc} + (1 - k_{sc}) \frac{9 b_{c2}}{19 b_{c2} + b_{k2}}. \end{aligned}\right\} \tag{3.271}$$

Проводимость рассеяния статора, не зависящая от тока,

$$\lambda_{sn1} = \lambda_{z1} k_{sz} + \lambda_{c1} k_{sc} + \lambda_{k1} k_{sk1} + \lambda_{t1} + \lambda_{s1}. \tag{3.272}$$

Проводимость рассеяния статора, зависящая от тока,

$$\lambda_{sni1} = \lambda_{n1} - \lambda_{sn1}. \tag{3.273}$$

Суммарная проводимость рассеяния взаимной индукции по пазу верхней клетки, не зависящая от тока:

при $\neg$ТО2

$$\lambda_{s23} = \frac{1}{Q_2} [(\lambda_{kn3} Q_{t2} + \lambda_{k23} Q_{k2}) k_{sk2} + \lambda_{tn3} Q_{g2} + \lambda_{t23}(Q_{t2} - Q_{g2}) + \lambda_{g23} Q_{g2}]; \tag{3.274}$$

при ТО2

$$\lambda_{s23} = \frac{Q_{t2}}{Q_2} \lambda_{t23} k_{sk2}. \tag{3.274a}$$

Проводимость рассеяния взаимной индукции по пазу верхней клетки, зависящая от тока,

$$\lambda_{si23} = \lambda_{23} - \lambda_{s23}. \tag{3.275}$$

Общая проводимость рассеяния взаимной индукции, не зависящая от тока,

$$\lambda_{sn23} = \lambda_{z2} k_{sz} + k_{sc} \lambda_x + \lambda_b + \left[\lambda_{c2} - \Phi_0 \left(\lambda_{c2} - \frac{h_{c2}}{0{,}5 b_{k2}}\right)\right] k_{sc} + \lambda_r + \lambda_{s23}. \tag{3.276}$$

Общая проводимость рассеяния взаимной индукции, зависящая от тока,

$$\lambda_{sni23} = \lambda_{z2}(1 - k_{sz}) + \lambda_{bi} + \left[\lambda_{c2} - \Phi_0\left(\lambda_{c2} - \frac{h_{c2}}{0{,}5 b_{k2}}\right)\right] \times (1 - k_{sc}) + \Phi_0\left(\lambda_{c2} - \frac{h_{c2}}{0{,}5 b_{k2}}\right) \frac{b_{c2}}{\delta_e} \times \left[1 - (1 - k_{sc}) \Phi_0 \left(1 - \frac{I_{s1}}{I_{s2}}\right)\right] + \lambda_{si23} + \lambda_x (1 - k_{sc}). \tag{3.277}$$

Проводимость рассеяния ротора, не зависящая от тока:

при $\neg$В

$$\lambda_{sn2} = \lambda_{z2} k_{sz} + k_{sc} \lambda_x + \lambda_b + \left[\lambda_{c2} - \Phi_0\left(\lambda_{c2} - \frac{h_{c2}}{0{,}5 b_{k2}}\right)\right] k_{sc} + \lambda_{k2} k_{sk2} + \lambda_{t2} + \lambda_r; \tag{3.278}$$

при В

$$\lambda_{sn2} = \lambda_{sn23} + \lambda_3 (Q_3/Q)^2. \tag{3.278a}$$

Проводимость рассеяния ротора, зависящая от тока:

при $\neg$В

$$\lambda_{sni2} = \lambda_{z2}(1 - k_{sz}) + \lambda_{bi} + \left[\lambda_{c2} - \Phi_0\left(\lambda_{c2} - \frac{h_{c2}}{0{,}5 b_{k2}}\right)\right] \times (1 - k_{sc}) + \lambda_{k2}(1 - k_{sk2}) + \Phi_0 \left(\lambda_{c2} - \frac{h_{c2}}{0{,}5 b_{k2}}\right) \frac{b_{k2}}{\delta_e} \times$$

$$\times \left[1 - (1 - k_{sc})\Phi_0\left(1 - \frac{I_{s1}}{I_{s2}}\right)\right] + \lambda_x(1 - k_{sc}); \quad (3.279)$$

при В

$$\lambda_{sni2} = \lambda_{sni23}. \quad (3.279а)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статора, не зависящее от тока,

$$X_{s1} = X_1\lambda_{sn1}/\lambda_{n1}. \quad (3.280)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статора, зависящее от тока,

$$X_{si1} = X_1\lambda_{sni1}/\lambda_{n1}. \quad (3.281)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния ротора, не зависящее от тока,

$$X_{s2} = X_2\lambda_{sn2}/\lambda_{n2}. \quad (3.282)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния ротора, зависящее от тока,

$$X_{si2} = X_2\lambda_{sn2}/\lambda_{n2}. \quad (3.283)$$

3.19 МАКСИМАЛЬНЫЙ МОМЕНТ

В модели принято, что вытеснение тока в стержнях ротора не влияет существенно на значения максимального момента и критического скольжения, однако токи достаточно велики и насыщение путей рассеяния надо учитывать. Поскольку в этом случае индуктивное сопротивление рассеяния содержит компоненту, обратно пропорциональную току, усложняется вычисление критического скольжения или соответствующего тока, так как требуется решение уравнения четвертой степени.

В настоящей модели предложено приближенное решение уравнения четвертой степени для тока – (3.290). Ниже дан краткий вывод указанной формулы. Электромагнитная мощность (момент) двигателя в принятых относительных единицах может быть представлена в виде

$$T = I_2^2 R_2/s,$$

а уравнение для определения тока при единичном (номинальном) напряжении

$$1 = (I_2R_1 + T/I_2)^2 + (I_2X_{sk} + I_{s1}X_{ski})^2. \quad (3.284)$$

Рассматривая (3.284) как зависимость момента от тока (выраженную в неявном виде), для вычисления тока при максимальном моменте приравняем нулю производную момента по току:

$$0 = I_{m2}^2R_1^2 - (T_m/I_{m2})^2 + I_{m2}X_{sk}(I_{m2}X_{sk} + I_{s1}X_{ski})$$

или

$$\frac{T_m}{I_{m2}} = I_{m2}\sqrt{R_1^2 + X_{sk}^2 + \frac{X_{sk}X_{ski}I_{s1}}{I_{m2}}}.$$

Подставляя это выражение в (3.284), находим

$$1 = 2I_{m2}^2(R_1^2 + X_{sk}^2) + 3X_{sk}X_{ski}I_{s1}I_{m2} + (X_{ski}I_{s1})^2 + $$

$$+ I_{m2}^2 2R_1\sqrt{R_1^2 + X_{sk}^2 + \frac{X_{sk}X_{ski}I_{s1}}{I_m^2}}. \quad (3.285)$$

Обозначим в дальнейшем для сокращения записи

$$\sqrt{R_1^2 + X_{sk}^2} = z_m; \quad X_{ski}I_{s1} = E_s.$$

Поскольку $X_{sk}E_s/I_{m2} \ll z_m^2$, уравнение (3.285) можно представить в виде

$$1 - E_s^2 = 2I_{m2}^2(z_m^2 + R_1z_m) + I_{m2}(3 + R_1/z_m)X_{sk}E_s. \quad (3.286)$$

Решением этого квадратного уравнения является формула (3.290).

Для двигателей с двойной клеткой влияние индуктивного сопротивления на распределение токов между стержнями верхней и нижней клеток может оказаться существенным, что учтено соответствующими поправками при расчете активного и индуктивного сопротивлений ротора.

Индуктивное сопротивление короткого замыкания, не зависящее от тока,

$$X_{sk} = X_{s1}k_{nx1} + X_{s2}k_{n2}. \quad (3.287)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания, зависящее от тока,

$$X_{ski} = X_{si1}k_{nx1} + X_{si2}k_{n2}. \quad (3.288)$$

Расчетные параметры:

$$\left.\begin{aligned} z_m &= \sqrt{R_1^2 + X_{sk}^2}; \\ z_{mm} &= \sqrt{2 z_m (R_1 + z_m)}; \\ z_{mn} &= \frac{X_{sk}(3 z_m + R_1)}{2 z_{mm} z_m} \end{aligned}\right\} \qquad (3.289)$$

Рабочий ток при максимальном моменте

$$I_{m2} = [\sqrt{1 - (X_{ski} I_{s1})^2 (1 - z_{mm}^2)} - X_{ski} I_{s1} z_{mn}] / z_{mm}. \qquad (3.290)$$

Если $I_{m2} \leqslant I_{s1}$, то следует принять $k_{sz} = k_{sc} = k_{sk1} = k_{sk2} = 1$; если $I_{m2} \leqslant I_{s2}$, то

$$\Phi_0 [(\lambda_{c2} - h_{c2}/(0{,}5 b_{k2})] = 0$$

и необходимо пересчитать формулы, приведенные в § 3.18, и формулы (3.287) – (3.290). Если $I_{m2} > I_{s1}$ и $I_{m2} > I_{s2}$, то следует продолжать расчет с (3.291).

Отношение максимального момента к номинальному

$$k_m = (1 - s_n) I_{m2}^2 \sqrt{z_m^2 + X_{sk} X_{ski} I_{s1} / I_{m2}}. \qquad (3.291)$$

Критическое скольжение

$$s_m = \frac{R_2 k_{n2}}{\sqrt{z_m^2 + X_{sk} X_{ski} I_{s1} / I_{m2}}}. \qquad (3.292)$$

Расчетные параметры двойной клетки:

$$\chi_m = (R_{c2} + R_{c3}) / X_3; \quad \chi_r = R_{c2} / (R_{c2} + R_{c3}). \qquad (3.293)$$

Активное сопротивление двойной клетки ротора при максимальном моменте

$$R_{m2} = R_2 + X_3 \frac{\chi_m \chi_r^2}{1 + (\chi_m / s_m)^2}. \qquad (3.294)$$

Проводимость рассеяния двойной клетки ротора при максимальном моменте, не зависящая от тока,

$$\lambda_{sn2} = \lambda_{sn23} + \frac{\lambda_3 \chi_r^2 (\chi_m / s_m)^2}{1 + (\chi_m / s_m)^2}. \qquad (3.295)$$

Затем следует уточнить формулы (3.282), (3.287) – (3.291). Критическое скольжение

$$s_m = \frac{R_{m2} k_{n2}}{\sqrt{z_m^2 + X_{sk} X_{ski} I_{s1} / I_{m2}}}. \qquad (3.296)$$

3.20. УЧЕТ ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКА В СТЕРЖНЯХ РОТОРА

Простая клетка или верхняя часть двойной клетки характеризуется приведенными ниже параметрами.

Приведенная высота стержня

$$\xi_2 = \frac{h_{bt2} + h_{k2}}{10\sqrt{50}} \sqrt{\gamma_{c2} \frac{f}{50}}. \qquad (3.297)$$

Глубина проникновения, мм,

$$h_{v2} = (h_{bt2} + h_{k2}) / \varphi(\xi_2). \qquad (3.298)$$

Сечение стержня с учетом вытеснения, мм^2:

при $h_{v2} > h_{k2}$

$$Q_{v2} = Q_{k2} + \left[b_{k2} - \frac{b_{k2} - b_{g2}}{2 h_{bt2}} (h_{v2} - h_{k2}) \right] (h_{v2} - h_{k2}); \qquad (3.299)$$

при $(h_{v2} \leqslant h_{k2}) \wedge$ КО2

$$Q_{v2} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{b_{k2}}{2} - h_{k2} + h_{v2} \right) \sqrt{\frac{b_{k2}}{2} \left(\frac{b_{k2}}{2} - h_{k2} + h_{v2} \right)}; \qquad (3.299а)$$

при $(h_{v2} \leqslant h_{k2}) \wedge$ КТ2

$$Q_{v2} = h_{v2} (b_{c2} + h_{v2} / \operatorname{tg} \alpha_{k2}). \qquad (3.299б)$$

Активное сопротивление стержня с учетом вытеснения тока

$$R_{vc} = R_c Q_2 / Q_{v2}. \qquad (3.300)$$

Коэффициент демпфирования

$$k_{d2} = \lambda(\xi_2) + \frac{\Phi_0(\xi_2 - 1)}{1 - 0{,}45\xi_2 + 0{,}27\xi_2^2}[0{,}016\,\Phi_0(b_{k2}/b_{g2} - 1) +$$

$$+ 0{,}021\,\Phi_0(b_{g2}/b_{k2} - 1)]. \quad (3.301)$$

Проводимость рассеяния простой клетки с учетом насыщения и вытеснения, не зависящая от тока,

$$\lambda_{svn2} = \lambda_{z2}k_{sz} + k_{sc}\lambda_x + \lambda_b + \left[\lambda_{c2} - \Phi_0\left(\lambda_{c2} - \frac{h_{c2}}{0{,}5b_{k2}}\right)\right] \times$$

$$\times k_{sc} + (\lambda_{k2}k_{sk2} + \lambda_{t2})k_{d2} + \lambda_r. \quad (3.302)$$

Проводимость рассеяния простой клетки с учетом насыщения и вытеснения, зависящая от тока,

$$\lambda_{svi2} = \lambda_{z2}(1 - k_{sz}) + \lambda_{bi} + \left[\lambda_{c2} - \Phi_0\left(\lambda_{c2} - \frac{h_{c2}}{0{,}5b_{k2}}\right)\right] \times$$

$$\times (1 - k_{sc}) + \lambda_{k2}(1 - k_{sk2})k_{d2} + \Phi_0\left(\lambda_{c2} - \frac{h_{c2}}{0{,}5b_{k2}}\right) \times$$

$$\times \frac{b_{c2}}{\delta_e}\left[1 - (1 - k_{sc})\Phi_0\left(1 - \frac{I_{s1}}{I_{s2}}\right)\right] + \lambda_x(1 - k_{sc}). \quad (3.303)$$

Двойная клетка ротора имеет следующие параметры.

Проводимость рассеяния взаимной индукции с учетом насыщения и вытеснения, не зависящая от тока,

$$\lambda_{sv23} = \lambda_{s23}k_{d23}(\xi_2)k_{d2}. \quad (3.304)$$

Общая проводимость рассеяния взаимной индукции, не зависящая от тока,

$$\lambda_{vn23} = \lambda_{z2}k_{sz} + k_{sc}\lambda_x + \lambda_b +$$

$$+ \left[\lambda_{c2} - \Phi_0\left(\lambda_{c2} + \frac{h_{c2}}{0{,}5b_{k2}}\right)\right]k_{sc} + \lambda_{sv23} + \lambda_r. \quad (3.305)$$

Проводимость рассеяния взаимной индукции с учетом насыщения и вытеснения, зависящая от тока,

$$\lambda_{vi23} = \lambda_{si23}k_{d23}(\xi_2)k_{d2}. \quad (3.306)$$

Общая проводимость рассеяния взаимной индукции с учетом насыщения и вытеснения, зависящая от тока,

$$\lambda_{svi2} = \lambda_{sni2} - \lambda_{si23} + \lambda_{vi23}. \quad (3.307)$$

Приведенная высота стержня нижней клетки

$$\xi_3 = \frac{h_{bt3} + h_{k3}}{10\sqrt{50}}\sqrt{\gamma_{c2}\frac{f}{50}}. \quad (3.308)$$

Глубина проникновения, мм,

$$h_{v3} = (h_{bt3} + h_{k3})/\varphi(\xi_3). \quad (3.309)$$

Сечение стержня с учетом вытеснения, мм^2;

при $h_{v3} > h_{k3}$

$$Q_{v3} = Q_{k3} + \left[b_{k3} - \frac{b_{k3} - b_{g3}}{2h_{bt3}}(h_{v3} - h_{k3})\right](h_{v3} - h_{k3}); \quad (3.310)$$

при $(h_{v3} \leqslant h_{k3}) \wedge$ КОЗ

$$Q_{v3} = \frac{\pi}{2}\left(\frac{b_{k3}}{2} - h_{k3} + h_{v3}\right)\sqrt{\frac{b_{k3}}{2}\left(\frac{b_{k3}}{2} - h_{k3} + h_{v3}\right)}; \quad (3.310а)$$

при $(h_{v3} \leqslant h_{k3}) \wedge$ КТЗ

$$Q_{v3} = h_{v3}\left(b_{c3} + \frac{h_{v3}}{\operatorname{tg}\alpha_{k3}}\right). \quad (3.311)$$

Активное сопротивление нижнего стержня с учетом вытеснения тока

$$R_{vc3} = R_{c3}Q_3/Q_{v3}. \quad (3.312)$$

Взаимное сопротивление

$$R_{v23} = R_{vc}k_{v23}(\xi_2), \quad (3.313)$$

где коэффициент взаимного сопротивления $k_{v23}(\xi_2)$ – по (3.9).

Коэффициент демпфирования

$$k_{d3} = \lambda(\xi_3) + \frac{\Phi_0(\xi_3 - 1)}{1 - 0{,}45\xi_3 + 0{,}27\xi_3^2}[0{,}016\,\Phi_0(b_{k3}/b_{g3} - 1) +$$

$$+ 0{,}021\,\Phi_0\,(b_{g3}/b_{k3} - 1)\,], \quad (3.314)$$

где $\lambda(\xi_3)$ – по (3.7).

Проводимость рассеяния нижней клетки с учетом вытеснения тока

$$\lambda_{v3} = \lambda_{c3} + (\lambda_{k3} + \lambda_{t3})k_{d3} + (\lambda_{n3} - \lambda_{23})\,k_{d2}k_{d23}. \quad (3.315)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния нижней клетки с учетом вытеснения тока

$$X_{v3} = X_2\lambda_{v3}/\lambda_{n2}. \quad (3.316)$$

Расчетное активное сопротивление верхнего стержня

$$R_{bvc} = R_{vc} - R_{v23}. \quad (3.317)$$

Расчетное активное сопротивление нижнего стержня

$$R_{bvc3} = R_{vc3} + R_{v23}. \quad (3.318)$$

Расчетные параметры:

$$\left.\begin{aligned} \chi_{vm} &= (R_{bvc} + R_{bvc3})/X_{v3}; \\ \chi_{vr} &= R_{bvc}/(R_{bvc} + R_{bvc3}). \end{aligned}\right\} \quad (3.319)$$

Активное сопротивление ротора при пуске:

при $\neg B$

$$R_{v2} = R_{vc} + R_r; \quad (3.320)$$

при B

$$R_{v2} = R_r + R_{v23} + R_{bvc3}\chi_{vr} + X_{v3}\frac{\chi_{vr}^2\chi_{vm}}{(1 + \chi_{vm}^2)}. \quad (3.320а)$$

Проводимость рассеяния ротора при пуске, не зависящая от тока (для двойной клетки),

$$\lambda_{svn2} = \lambda_{vn23} + \lambda_{v3}\chi_{vr}^2\frac{\chi_{vm}^2}{(1 + \chi_{vm}^2)}. \quad (3.321)$$

Индуктивное сопротивление ротора при пуске, не зависящее от тока,

$$X_{v2} = X_2\lambda_{svn2}/\lambda_{n2}. \quad (3.322)$$

Индуктивное сопротивление ротора при пуске, зависящее от тока,

$$X_{vi2} = X_2\lambda_{svi2}/\lambda_{n2}. \quad (3.323)$$

3.21. НАЧАЛЬНЫЕ ПУСКОВЫЕ ТОК, МОМЕНТ, МОЩНОСТЬ. СКОРОСТЬ НАРАСТАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТКИ СТАТОРА ПРИ ЗАТОРМОЖЕННОМ РОТОРЕ

Активное и индуктивное сопротивления обмоток статора и ротора для расчета пускового режима определяются с учетом насыщения путей потоков рассеяния и вытеснения тока в стержнях ротора. Для определения коэффициентов пересчета этих параметров для Г-образной схемы замещения в данном случае не предлагается заново производить расчет магнитной цепи для определения коэффициента рассеяния. Без большой ошибки могут быть использованы значения, вычисленные при расчете номинального режима.

Активное сопротивление короткого замыкания

$$R_{vk} = R_1 + R_{v2}k_{n2}. \quad (3.324)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания, не зависящее от тока,

$$X_{vk} = X_{s1}k_{nx1} + X_{v2}k_{n2}. \quad (3.325)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания, зависящее от тока,

$$X_{vki} = X_{si1}k_{nx1} + X_{vi2}k_{n2}. \quad (3.326)$$

Ток ротора при пуске

$$I_{k2} = \frac{1 - (X_{vki}I_{s1})^2}{\sqrt{R_{vk}^2[1 - (X_{vki}I_{s1})^2] + X_{vk}^2} + X_{vk}X_{vki}I_{s1}}. \quad (3.327)$$

Если $I_{k2} \leqslant I_{s1}$, то следует принять $k_{sz} = k_{sc} = k_{sk1} = k_{sk2} = 1$; если $I_{k2} \leqslant I_{s2}$, то

$$\Phi_0\left(\lambda_{c2} - \frac{h_{c2}}{0{,}5\,b_{k2}}\right) = 0$$

и необходимо пересчитать формулы, приведенные в § 3.18, 3.20, и формулы (3.324) – (3.327).

Если $I_{k2} > I_{s1}$ и $I_{k2} > I_{s2}$, то расчет продолжается.

Расчетное реактивное сопротивление короткого замыкания

$$X_{bk} = X_{vk} + X_{vki}I_{s1}/I_{k2}. \quad (3.328)$$

Отношение начального пускового момента к номинальному

$$k_k = (1 - s_n)I_{k2}^2R_{v2}k_{n2}. \quad (3.329)$$

Отношение начального пускового тока к номинальному

$$k_i = (I_{k2} + I_{0r})/I_1. \quad (3.330)$$

Отношение потребляемой начальной пусковой мощности к номинальной

$$k_p = k_i/(\eta \cos \varphi_n). \quad (3.331)$$

Скорость нарастания температуры обмотки статора при заторможенном роторе, °C/c,

$$\Theta = \left(\frac{k_i I_i I_1}{a_1 q_{Cu1}} \right)^2 \frac{1}{K}. \quad (3.332)$$

3.22. РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА

При оптимизационных расчетах, как правило, не требуется знание тока холостого хода для вычисления критериальной функции. Однако при использовании предлагаемой модели для поверочного расчета (например, для сравнения результатов расчета и опыта) знание параметров холостого хода необходимо.

Активная составляющая тока холостого хода определяется из условия равенства для баланса мощности

$$I_{0a} = I_{0a}^2 R_1 + P_{b0}.$$

Формула (3.341) представляет собой решение этого квадратного уравнения.

Реактивное сопротивление главного поля при холостом ходе

$$X_0 = 0{,}4\sqrt{2} \frac{\tau}{\delta_b A_b}, \quad (3.333)$$

где δ_b – по (3.196).

Коэффициент рассеяния статора при холостом ходе

$$\tau_{01} = X_1/X_0. \quad (3.334)$$

Коэффициент сопротивления при холостом ходе

$$k_0 = R_1/(X_1 + X_0). \quad (3.335)$$

ЭДС холостого хода

$$E_0 = \frac{1}{(1 + \tau_{01})\sqrt{1 + k_0^2}}. \quad (3.336)$$

Если $|1 - E_0/E_{v0}|(k_{mg} - 1) \geqslant 0{,}01$, где k_{mg} определяется по (3.195), то следует принять расчетное значение ЭДС холостого хода равным

$$E_{b0} = E_0 + (E_{v0} - E_0)/3, \quad (3.337)$$

индукцию в воздушном зазоре, Тл,

$$B_g = B_{0g} E_{b0}/E_{v0} \quad (3.338)$$

и далее пересчитать формулы, приведенные в § 3.14.

Реактивная составляющая тока холостого хода

$$I_{0r} = \frac{1}{X_1(1 + \tau_{01})(1 + k_0^2)}. \quad (3.339)$$

Расчетная мощность

$$P_{b0} = P_r + P_{jz1} + I_{0r}^2 R_1. \quad (3.340)$$

Активная составляющая тока холостого хода

$$I_{0a} = \frac{P_{b0}}{0{,}5 + \sqrt{0{,}25 - P_{b0} R_1}}. \quad (3.341)$$

Ток холостого хода

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2}. \quad (3.342)$$

Потери в обмотке статора при холостом ходе

$$P_{0c1} = I_0^2 R_1. \quad (3.343)$$

3.23. ПЕРЕВОД СОПРОТИВЛЕНИЙ, ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И ТОКОВ ИЗ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ В АБСОЛЮТНЫЕ

Перевод сопротивлений выполняется по формуле

$$Z_a = Z_p\, 3U^2 \cdot 10^{-3}/P, \quad (3.344)$$

где Z_a – абсолютное значение активного или индуктивного сопротивления, Ом; Z_p – относительное значение рассчитанных сопротивлений.

Перевод потерь мощности

$$P_a = P_p P, \quad (3.345)$$

где P_a – абсолютное значение составляющей потерь, кВт; P_p – относительное значение рассчитанной составляющей потерь.

Перевод токов

$$I_a = I_p I_i, \tag{3.346}$$

где I_a – абсолютное значение тока, А; I_p – относительное значение тока; I_i – базовый ток, А, по (3.123).

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ДОБАВОЧНЫЕ ПОТЕРИ И МОМЕНТЫ

4.1. ВВЕДЕНИЕ

Высшие гармоники поля в воздушном зазоре АД создают добавочные потери, магнитный шум при работе АД под нагрузкой и на холостом ходу, а также добавочные асинхронные и синхронные моменты при пуске АД. Шум, вызванный высшими гармониками поля, будет рассмотрен в гл. 6 наряду с шумом аэродинамического происхождения. В этой главе рассматриваются только добавочные потери и моменты.

При проектировании АД важна оценка этих явлений с целью выбора размеров и параметров двигателя, при которых добавочные потери и моменты не превышают допустимых значений. Явления, связанные с высшими гармониками поля, физически сложны, методы их расчета носят приближенный характер несмотря на многие исследования. В настоящей главе приведены результаты исследований по созданию методики расчета добавочных потерь и моментов в короткозамкнутых АД и по разработке методов их снижения.

4.2. ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ

Высшие гармоники магнитного поля в воздушном зазоре, создающие добавочные потери и моменты в АД, обусловлены двумя причинами:

1) размещением проводников с током в пазах статора и ротора (гармоники МДС). Обозначим гармоники поля, вызванные гармониками МДС при равномерном воздушном зазоре, индексом f;

2) неравномерностью воздушного зазора из-за зубчатой поверхности статора и ротора и возможного эксцентричного положения ротора относительно статора (гармоники магнитной проводимости воздушного зазора). Обозначим гармоники в этом случае индексом ξ.

При концентрическом расположении ротора относительно статора, что принимается при проектировании, порядок гармоник поля от МДС и полей от магнитной проводимости, а также их скорости движения

индентичны. Но эти поля сдвинуты по фазе относительно друг друга, так как гармоники МДС пропорциональны току в обмотке статора или ротора, а гармоники магнитной проводимости пропорциональны индукции основной волны магнитного поля, вызванного намагничивающим током, который является результатом совместного действия токов в обмотках статора и ротора. При идеальном холостом ходе ток основной гармоники в обмотке ротора отсутствует, а гармоники магнитного напряжения и магнитной проводимости совпадают по фазе.

Кривая МДС трехфазной обмотки статора с целым числом пазов на полюс и фазу q_1 и с фазной зоной $\pi/3$ содержит гармоники порядка

$$\nu_f = p(6g_1 + 1), \tag{4.1}$$

где p – число пар полюсов; g_1 – любое целое положительное или отрицательное число:

$$g_1 = 0, \pm 1, \pm 2 \dots .$$

Обмотка с переключением числа полюсов в отношении 1:2 по схеме Даландера при большем числе полюсов имеет фазную зону $2\pi/3$ и создает гармоники МДС порядка

$$\nu_f = p(3g_1 + 1). \tag{4.2}$$

Частота вращения высших гармоник МДС статора в ν_f/p раз меньше частоты вращения основной волны:

$$n_\nu = n_1 p/\nu_f, \tag{4.3}$$

а направление вращения совпадает с направлением вращения основной волны, если ν_f – положительное число, и противоположно ему, если ν_f – отрицательное число.

Амплитуда индукции ν_f-й гармоники поля в равномерном воздушном зазоре, вызванной ν_f-й гармоникой МДС статора, определяется формулой

$$B_{\nu f} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{\mu_0}{\delta k_{g\nu} k_{mg1}} \frac{w_1 k_{w\nu}}{|\nu_f|} I_1, \tag{4.4}$$

где μ_0 – магнитная постоянная; δ – воздушный зазор; I_1 – фазный ток статора; w_1 – число витков обмотки фазы статора; $k_{g\nu}$ – коэффициент воздушного зазора (коэффициент Картера) для ν-й гармоники; k_{mg1} – коэффициент насыщения статора; $k_{w\nu}$ – обмоточный коэффициент для ν_f-й гармоники.

Обмоточный коэффициент $k_{w\nu}$ представляет собой произведение трех коэффициентов:

коэффициента распределения

$$k_{q\nu} = \frac{\sin\left(\frac{\nu_f}{p}\ \frac{\pi}{6}\right)}{q_1 \sin\left(\frac{\nu}{p}\ \frac{\pi}{6q_1}\right)}; \tag{4.5}$$

где $q_1 = z_1/(6p)$ для шестизонной обмотки; $q_1 = z_1/(3p)$ для трехзонной обмотки; z_1 — число пазов статора;

коэффициента укорочения

$$k_{\beta\nu} = \sin\left(\frac{\nu_f}{p}\ \frac{y}{3q_1}\ \frac{\pi}{2}\right) \tag{4.6}$$

и коэффициента открытия пазов, учитывающего линейное распределение МДС катушки по ширине b_{c1} открытия паза,

$$k_{c\nu} = \frac{\sin(\nu_f b_{c1}/D_{i1})}{\nu_f b_{c1}/D_{i1}}, \tag{4.7}$$

где D_{i1} — внутренний диаметр сердечника статора.

В разработанной методике коэффициент воздушного зазора $k_{g\nu}$ для гармоник порядка $|\nu_f| \leqslant z_1 - p$ принимается равным коэффициенту k_{g1} для основной волны, а для гармоник более высокого порядка $k_{g\nu} = 1$.

Особенно опасными с точки зрения добавочных моментов и потерь являются гармоники, для которых $k_1 = g_1/q_1$ — целое число, т.е. порядок этих гармоник равен

$$\nu_f = k_1 z_1 + p, \tag{4.8}$$

где $k_1 = \pm 1, \pm 2\ldots$

Для этих гармоник, называемых зубцовыми, обмоточные коэффициенты распределения и укорочения принимают такие же значения, как для основной гармоники. Для остальных гармоник эти коэффициенты значительно меньше.

Каждая гармоника поля статора порядка ν индуктирует в короткозамкнутом роторе ток, который создает гармоники МДС порядка

$$\mu_f = \nu + k_2 z_2, \tag{4.9}$$

где $k_2 = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots, z_2$ — число пазов ротора.

Амплитуды индукции гармоник поля в воздушном зазоре от этих гармоник МДС ротора равны

$$B_{\mu f} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi}\ \frac{\mu_0}{\delta k_{mg2} k_{g\mu}}\ \frac{z_2}{|\mu_f|}\ k_{c\mu} I_{2\nu}, \tag{4.10}$$

или после приведения тока $I_{2\nu}$ от ν-й гармоники в стержне ротора к обмотке статора

$$B_{\mu f} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}\ \frac{\mu_0}{\delta k_{mg2} k_{g\mu}}\ \frac{w_1 k_{q\nu} k_{\beta\nu} k_{c\mu}}{|\mu_f|}\ I'_{2\nu}, \tag{4.10a}$$

где $I'_{2\nu}$ — ток ротора, приведенный к обмотке статора; k_{mg2} — коэффициент насыщения ротора; $k_{c\mu}$ — коэффициент открытия паза ротора, рассчитываемый по формуле

$$k_{c\mu} = \frac{\sin(\mu_f b_{c2}/D_{i1})}{\mu_f b_{c2}/D_{i1}}; \tag{4.11}$$

b_{c2} — ширина шлица паза ротора.

Для основной волны $\nu = p$ ток I'_2 при нагрузке можно рассчитать по фазному току статора I_1, току I_0 холостого хода и фазному углу φ, соответствующему коэффициенту мощности $\cos\varphi$ при нагрузке, т.е.

$$I'_2 = \sqrt{I_1^2 + I_0^2 - 2I_1 I_0 \sin\varphi}. \tag{4.12}$$

Магнитное поле μ_f-й гармоники ротора движется относительно ротора со скоростью

$$n_{2\mu} = n_1 \frac{s_\nu p}{\mu_f}, \tag{4.13}$$

где s_ν — скольжение ротора относительно ν-й гармоники поля, а относительно статора — со скоростью

$$n_{1\mu} = n_1(1 - s + s_\nu p/\mu_f), \tag{4.14}$$

где n_1 — частота вращения основной гармоники.

Частота ЭДС, индуктируемых гармониками ротора порядка μ_f в статоре, равна

$$f_{1\mu} = f_1 \left| s_\nu + \frac{\mu_f}{p}(1 - s) \right|. \tag{4.15}$$

При холостом ходе и приближенно при нагрузке, если $\nu = p$,

$$f_{1\mu} = f_1 |\mu_f/p|, \tag{4.16}$$

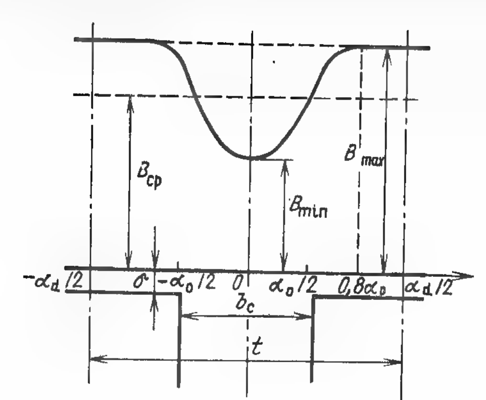


Рис. 4.1. Распределение индукции в воздушном зазоре на зубцовом делении

а при вращении ротора с частотой n_1 в направлении, противоположном основному полю $(s = 2)$,

$$f_{1\mu} = f_1 |2 - \mu_f/p|. \tag{4.17}$$

Предположим, что одна поверхность, обращенная к воздушному зазору, гладкая, а вторая – зубчатая. Тогда распределение индукции в воздушном зазоре на зубцовом делении статора или ротора, представленное на рис. 4.1, аппроксимируется следующим выражением:

при $0 < \alpha < 0{,}8\alpha_0$

$$B(\alpha) = (1 - \beta - \beta\cos\frac{\pi}{0{,}8\alpha_0}\alpha)B_{max}; \tag{4.18}$$

при $0{,}8\alpha_0 < \alpha < \alpha_d$

$$B(\alpha) = B_{max}. \tag{4.18a}$$

Коэффициент β, равный

$$\beta = (B_{max} - B_{min})/(2B_{max}), \tag{4.19}$$

зависит от отношения b_c/δ. Известная зависимость $\beta = f(b_c/\delta)$, полученная методом конформных отображений, может быть аппроксимирована функцией

$$\beta = 0{,}43\left[1 - \exp\left(-\frac{b_c/\delta - 0{,}7}{3{,}3}\right)\right]. \tag{4.20}$$

Распределению индукции на зубцовом делении по (4.18) соответствует коэффициент воздушного зазора, равный

$$k_g = B_{max}/B_{ср} = t/(t - 1{,}6\beta b_c). \tag{4.21}$$

Принятая кривая поля (4.18) может быть разложена в ряд Фурье

$$B(\alpha) = B_{ср} - \sum_{k=1}^{k=\infty} B_{\xi k}\cos kz\alpha, \tag{4.22}$$

причем амплитуды отдельных гармоник рассчитываются по известным формулам для коэффициентов Фурье в виде

$$B_{\xi k} = \frac{\beta}{2} k_g F_k B_{ср}, \tag{4.23}$$

где

$$F_k = \frac{2}{\pi k} \frac{\sin\left(1{,}6k\frac{b_c}{t}\pi\right)}{1 - \left(1{,}6k\frac{b_c}{t}\right)^2}. \tag{4.24}$$

Под средним значением индукции $B_{ср}$ понимается амплитуда основной волны B_g в воздушном зазоре. Если для некоторого порядка k знаменатель в формуле (4.24) равен нулю, то функция принимает предельное значение, равное

$$F_k = 1/k. \tag{4.25}$$

Гармоники поля, вызванные переменной магнитной проводимостью воздушного зазора из-за зубчатости статора, и гармоники поля от зубцовых гармоник МДС движутся с одинаковой скоростью, но сдвинуты относительно друг друга. Этот сдвиг возникает по двум причинам:

начало координат для гармоник МДС совпадает с осью фазы, которая в зависимости от шага обмотки проходит посредине зубца или паза, а начало координат для гармоник магнитной проводимости всегда совпадает с осью паза;

гармоники МДС совпадают по фазе с током статора, а гармоники поля от магнитной проводимости совпадают по фазе с намагничивающим током.

Для сложения гармоник индукций обоих видов полей необходимо привести гармоники магнитной проводимости к оси фазы обмотки, умножив амплитуду по (4.23) на выражение

$$(-1)^{k(3q_1 - y) + k + 1}. \tag{4.26}$$

Результирующая амплитуда гармоник поля статора зубцового порядка (без учета реакции ротора) рассчитывается по формуле

$$B_\nu = \sqrt{B_{\xi\nu}^2 + B_{f\nu}^2 + 2B_{\xi\nu}B_{f\nu}\sin\varphi}, \tag{4.27}$$

в которую $B_{\xi\nu}$ подставляют с учетом знака по (4.26).

В режиме холостого хода результирующая амплитуда индукции поля определяется алгебраическим сложением составляющих:

$$B_{\nu 0} = B_{\xi \nu 0} + B_{f \nu 0}. \qquad (4.28)$$

В режиме противовключения ($s = 2$) гармониками поля от неравномерности зазора можно пренебречь из-за малого значения намагничивающего тока по сравнению с током статора, поэтому амплитуда B_ν определяется по амплитуде $B_{f\nu 0}$ при холостом ходе:

$$B_{\nu(s=2)} = B_{f\nu 0} \frac{I_2'}{I_0} k_{mg1}. \qquad (4.29)$$

Амплитуды $B_{\xi\mu}$ гармоник магнитной проводимости ротора можно рассчитать аналогично $B_{\xi\nu}$.

Так как ток ротора сдвинут относительно намагничивающего тока приблизительно на угол $\pi/2$, то

$$B_\mu = \sqrt{B_{\xi\mu}^2 + B_{f\mu}^2}. \qquad (4.30)$$

4.3. ЭДС И ТОКИ, ИНДУКТИРУЕМЫЕ ГАРМОНИКАМИ ПОЛЯ СТАТОРА В РОТОРЕ

Гармоники ν-го порядка поля статора индуктируют в обмотке ротора ЭДС, частота которых

$$f_{2\nu} = f_1 \left| 1 - \frac{\nu}{p}(1-s) \right|. \qquad (4.31)$$

Если выразить распределение индукции $B_\nu(x_2)$ в момент времени $t = 0$ по окружности ротора (рис. 4.2) в виде

$$B_{\nu x} = B_\nu \cos \nu x_2, \qquad (4.32)$$

то поток, проникающий в зубец ротора,

$$\overline{\Phi}_{2\nu} = \frac{D_{i1}}{2} l B_\nu \int_{-k_{T2}\frac{\pi}{z_2}}^{k_{T2}\frac{\pi}{z_2}} \cos \nu x_2 \, dx_2 = \frac{\pi l D_{i1}}{z_2} B_\nu k_{T2} \eta_{2\nu} \qquad (4.33)$$

и ЭДС, индуктируемая этим потоком в контуре, состоящем из двух соседних стержней клетки и двух участков короткозамыкающих колец, охватывающих этот зубец, определяется как

$$E_{2\nu}^* = \sqrt{2} \pi f_{2\nu} l t_2 k_{T2} \eta_{2\nu} B_\nu. \qquad (4.34)$$

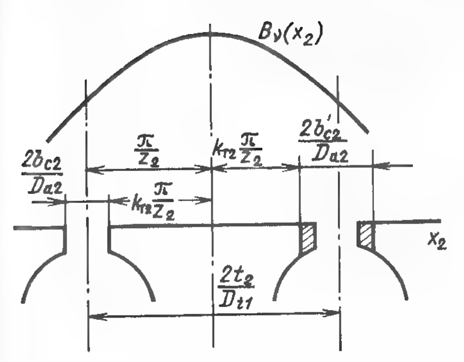


Рис. 4.2. Поток ν-й гармоники поля статора, проникающий в зубец ротора

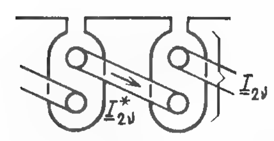


Рис. 4.3. Замещение клетки ротора контурами, охватывающими зубец

Коэффициент k_{T2} учитывает относительное уменьшение ширины коронки зубца из-за шлица b_{c2}

$$k_{T2} = \frac{t_2 - b_{c2}}{t_2}, \qquad (4.35)$$

где t_2 – зубцовое деление ротора, а коэффициент $\eta_{2\nu}$ – потокосцепление контура клетки с ν-й гармоникой поля:

$$\eta_{2\nu} = \frac{\sin(k_{T2} \nu\pi/z_2)}{k_{T2} \nu\pi/z_2}. \qquad (4.36)$$

Под влиянием потоков рассеяния коронки зубцов насыщаются, что может быть учтено коэффициентом k_{c2}, учитывающим увеличение ширины шлица b_{c2} до значения $b_{c2}' = k_{c2} b_{c2}$ (рис. 4.2). Соответственно значения коэффициентов k_{T2} и $\eta_{2\nu}$ изменяются на k_{T2}' и $\eta_{2\nu}'$.

ЭДС, индуктируемые в соседних стержнях, составляющих контур, сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол $2\pi\nu/z_2$ и равны

$$E_{2\nu} = \frac{E_{2\nu}^*}{2\sin(\nu\pi/z_2)}. \qquad (4.37)$$

Токи и сопротивления клетки можно выразить двумя способами: либо базируясь на токах $I_{2\nu}$ и ЭДС $E_{2\nu}$, индуктируемых в стержнях, либо заменяя клетку контурами (рис. 4.3), в которых индуктируются ЭДС $E_{2\nu}^*$ и токи $I_{2\nu}^*$, равные токам в короткозамыкающих кольцах. В методике расчета применяются оба способа.

Токи, активные и индуктивные сопротивления колец и стержней связаны следующими зависимостями:

$$I^*_{2\nu} = \frac{I_{2\nu}}{2\sin(\nu\pi/z_2)}; \quad R^*_{2\nu} = R_{2\nu}[2\sin(\nu\pi/z_2)]^2 = $$
$$= 2R_R + R_{c\nu}[2\sin(\nu\pi/z_2)]^2;$$
$$L^*_{z2\nu} = L_{z2\nu}[2\sin(\nu\pi/z_2)]^2 = 2L_R + L_{c\nu}[2\sin(\nu\pi/z_2)]^2, \quad (4.38)$$

где R_R и L_R – соответственно активное сопротивление и индуктивность участка короткозамыкающего кольца между двумя соседними стержнями; $R_{c\nu}$ и $L_{c\nu}$ – активное сопротивление и индуктивность пазового рассеяния стержня для токов ν-й гармоники.

При втором способе расчета токов в клетке получается очень простая формула для индуктивности рассеяния в воздушном зазоре через магнитную проводимость λ_δ части воздушного зазора, приходящейся на элементарный контур клетки:

$$L^*_{2\delta\nu} = \lambda_\delta = \mu_0 l \frac{t_2 - b_{c2}}{\delta k_g} = \frac{\mu_0 \pi D_{i1} l k_{T2}}{\delta k_g z_2}. \quad (4.39)$$

Взаимная индуктивность обмотки статора и контура клетки ротора для ν-й гармоники поля получается из (4.34) с учетом (4.4):

$$L^*_{21\nu} = \frac{E^*_{2\nu}}{2\pi f_{2\nu} I_1} = \frac{3\mu_0 l D_{i1}}{\delta k_g k_{mg1} |\nu| z_2} z_1 k_{w\nu} k_{T2} \eta_{2\nu}. \quad (4.40)$$

Ток ν-й гармоники в контуре клетки

$$I^*_{2\nu} = \frac{2\pi f_{2\nu} L^*_{21\nu} I_1}{\sqrt{(R^*_{2\nu})^2 + [2\pi f_{2\nu}(L^*_{z2\nu} + L^*_{2\delta\nu})]^2}}. \quad (4.41)$$

Все полученные выше формулы относятся к роторам без скоса пазов. При скосе пазов ротора явления значительно усложняются. Фазы ЭДС, индуктируемых в отдельных участках стержня, меняются вдоль сердечника и сдвиг фазы для ν-й гармоники на единицу длины сердечника равен

$$\alpha_\nu = 2b_{sk} |\nu| / (D_{i1} l), \quad (4.42)$$

где b_{sk} – скос паза.

Если изоляция между стержнями клетки и листами сердечника недостаточна, появляются поперечные токи между стержнями (рис. 4.4). Токи и ЭДС в этом случае можно рассчитывать по Одоку, считая распределение параметров электрических цепей клетки равномерным. Предполагается постоянным также значение активного сопротивления γ_q изо-

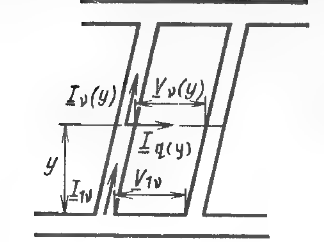


Рис. 4.4. Схема токов в роторе при скосе пазов

ляции между участками соседних стрежней, отнесенное к единице длины. Такое предположение по исследованиям Кашика при расчете добавочных потерь приемлемо.

В разработанной методике расчета принято для упрощения, что индуктивным сопротивлением цепи поперечных токов, а также сопротивлением короткозамыкающего кольца можно пренебречь, так как они обычно значительно меньше поперечного активного сопротивления γ_q. При этих допущениях получим дифференциальное уравнение для цепи контурного тока:

$$-\frac{d^2 \underline{I}_\nu(y)}{dy^2} \gamma_{q\nu} + \underline{I}_\nu(y) z_{c\nu} = \underline{u}^*_{2\nu} e^{j\alpha_\nu y}. \quad (4.43)$$

Это уравнение представляет собой зависимость тока $\underline{I}_\nu$ в стержне от расстояния y от края сердечника. Сопротивление $\gamma_{q\nu}$, продольное сопротивление $z_{c\nu}$, а также индуктируемая ЭДС $\underline{u}^*_{2\nu}$ отнесены к длине сердечника, т.е.

$$\gamma_{q\nu} = \frac{\gamma_q}{[2\sin(\nu\pi/z_2)]^2} = R_{q\nu} l;$$
$$\gamma_{c\nu} = R_{c\nu}/l; \quad x_{c\nu} = 2\pi f_{2\nu} L_{c\nu}/l; \quad (4.44)$$
$$\underline{z}_{c\nu} = \gamma_{c\nu} + j(x_{c\nu} + x_{\delta\nu}); \quad \underline{u}^*_{2\nu} = \underline{E}^*_{2\nu}/l,$$

где $\gamma_{c\nu}$ и $x_{c\nu}$ – соответственно активное сопротивление и сопротивление пазового рассеяния для ν-й гармоники с учетом вытеснения тока; $x_{\delta\nu}$ – сопротивление дифференциального рассеяния ν-й гармоники в воздушном зазоре.

При граничных условиях

$$\underline{I}_\nu(y = 0) = \underline{I}_{1\nu};$$

$$\underline{V}_\nu(y = 0) = 0,$$

где $\underline{V}_\nu(y)$ – напряжение между соседними стержнями на расстоянии y от края сердечника, получим решение дифференциального уравнения

(4.43) в виде

$$\underline{I}_\nu(y) = \underline{I}_{1\nu}\,\mathrm{ch}\underline{\gamma}_\nu y - \left(\frac{\mathrm{ch}\underline{\gamma}_\nu y}{\gamma_{q\nu}\underline{\beta}_\nu^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{j\alpha_\nu\,\mathrm{sh}\underline{\gamma}_\nu y}{\underline{Z}_\nu\underline{\beta}_\nu^2} \quad \frac{e^{j\alpha_\nu y}}{\gamma_{q\nu}\underline{\beta}_\nu^2} \right) \underline{u}_{2\nu}^*; \tag{4.45}$$

$$\underline{V}_\nu^*(y) = \underline{I}_{1\nu}\underline{Z}_\nu\,\mathrm{sh}\underline{\gamma}_\nu y + \left(\frac{\underline{Z}_\nu\,\mathrm{sh}\underline{\gamma}_\nu y}{\gamma_{q\nu}\underline{\beta}_\nu^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{j\alpha_\nu\,\mathrm{ch}\underline{\gamma}_\nu y}{\underline{\beta}_\nu^2} - \frac{j\alpha_\nu e^{j\alpha_\nu y}}{\underline{\beta}_\nu^2} \right) \underline{u}_{2\nu}^*, \tag{4.46}$$

где

$$\underline{V}_\nu^* = \frac{\underline{V}_\nu}{2j\sin(\nu\pi/z_2)\,e^{j\nu\pi/z_2}},$$

$$\underline{Z}_\nu = \sqrt{\underline{z}_{c\nu}\gamma_{q\nu}}; \tag{4.47}$$

$$\underline{\gamma}_\nu = \sqrt{\underline{z}_{c\nu}/\gamma_{q\nu}}; \tag{4.48}$$

$$\underline{\beta}_\nu^2 = \underline{\gamma}_\nu^2 + \alpha_\nu^2; \tag{4.49}$$

$\underline{Z}_\nu$ соответствует понятию волнового сопротивления; $\underline{\gamma}_\nu$ – постоянной распространения для однородной линии.

4.4. ДЕМПФИРОВАНИЕ ГАРМОНИК ПОЛЯ РОТОРА ОБМОТКОЙ СТАТОРА

Выше приведены формулы для расчета гармоник поля ротора без учета демпфирующего действия обмотки статора. Иногда это действие может привести к значительному увеличению добавочных моментов и потерь. Поэтому в разработанной методике предусмотрен учет демпфирования обмоткой статора отдельных гармоник ротора.

Гармоники ротора порядка μ_f по (4.9), вызванные гармониками ν поля статора, создают волны индукции в воздушном зазоре, амплитуды которых без учета демпфирующего действия статора определены формулами (4.10) и (4.30). Так как распределению этих волн индукции по

окружности ротора соответствует выражение

$$b_\mu = B_\mu \cos(2\pi f_{2\nu}t - \mu x_2), \tag{4.50}$$

то магнитный поток, приходящийся на зубцовое деление ротора, равен

$$\Phi_\mu = \frac{D_{i1}}{2} l \int\limits_{-\pi/z_2}^{\pi/z_2} b_\mu dx_2 =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}\pi} \frac{\mu_0}{\delta k_{mg} k_{g\mu}} lD_1 \frac{z_2}{\mu^2} k_{c\mu} \sin\frac{\mu\pi}{z_2} I_{2\nu} \tag{4.51}$$

и с учетом (4.37) индуктивность контура клетки ротора, соответствующая этому потоку,

$$L_{2\mu\nu}^* = \frac{\Phi_\mu}{\sqrt{2}\,I_{2\nu}^*} = \frac{\mu_0}{\pi\delta k_{mg} k_{g\mu}} lD_1 \frac{z_2}{\mu^2} k_{c\mu} \sin^2(\nu\pi/z_2). \tag{4.52}$$

При некоторых значениях μ гармоники ротора могут индуктировать ЭДС в обмотке статора. Значение ЭДС зависит от числа и способа соединения параллельных ветвей в обмотке статора и от схемы соединения фаз обмотки. Для учета влияния способа соединения параллельных ветвей на демпфирующее действие обмотки вводится коэффициент, равный для шестизонных обмоток

$$k_\alpha = \sin(c\alpha/2)/[c\sin(\alpha/2)], \tag{4.53}$$

где c – число катушечных групп, составляющих параллельную ветвь (в состав каждой фазы обмотки входит $2p$ групп при двухслойной и p групп при однослойной обмотках); α – фазный угол между ЭДС, индуктируемыми гармоникой поля порядка μ в соседних катушечных группах, входящих в одну параллельную ветвь.

Угол α можно рассчитать по следующим формулам:

для двухслойной обмотки

$$\alpha = m\pi(\mu/p + 1), \tag{4.54}$$

для однослойной обмотки

$$\alpha = 2m\pi(\mu/p + 1), \tag{4.55}$$

где m – шаг по катушечным группам, принадлежащим одной фазе, при образовании параллельной ветви (например, $m = 1$, если соседние катушки одной фазы образуют параллельную ветвь). Если $\alpha = 0$, то $k_\alpha = 1$.

Демпфирующее действие токов статора на поле гармоники ротора определяется коэффициентом

$$k_d = \left| \frac{jX_{h\mu}}{jX_{h\mu} + \underline{Z}_{1\mu}} \right| , \qquad (4.56)$$

где $X_{h\mu}$ – индуктивное сопротивление взаимной индукции обмотки статора для гармоники порядка μ, рассчитанное при частоте f_1:

$$X_{h\mu} = 3\omega_1 \frac{\mu_0}{\delta k_{g1\nu} k_{mg}} \frac{lD_{i1}}{\pi} z_1^2 \left(\frac{k_{w\mu}}{\mu} \right)^2 , \qquad (4.57)$$

где $k_{w\mu}$ – обмоточный коэффициент статора для гармоники порядка μ, рассчитанный по (4.5) и (4.6).

Сопротивление $Z_{1\mu}$ определяется активным R_1 и индуктивным X_1 сопротивлениями обмотки статора при коротком замыкании:

$$\underline{Z}_{1\mu} = R_1/s_\mu + jX_1, \qquad (4.58)$$

где по (4.15)

$$s_\mu = \frac{f_{1\mu}}{f_1} = s_\nu + \frac{\mu}{p}(1 - s). \qquad (4.59)$$

Если обмотка статора соединена в треугольник, а порядок гармоник μ кратен 3 p, т.е.

$$\mu/(3p) = \text{целое число}, \qquad (4.60)$$

то в обмотке статора наводится ток независимо от наличия и способа соединения параллельных ветвей. Мгновенные значения токов в отдельных фазах одинаковы, т.е. создаваемое этими токами пульсирующее магнитное поле можно представить в виде двух полей, вращающихся в противоположных направлениях. Амплитуда каждого из этих полей равна половине амплитуды пульсирующего поля. Поэтому поле гармоники ротора порядка μ по (4.60) демпфируется приблизительно до половины его первоначального значения ($k_d = 0{,}5$). При соединении обмотки статора в звезду демпфирование гармоник μ по (4.60) отсутствует.

Следует отметить, что скос пазов также влияет на демпфирующее действие обмотки статора, если

$$b_{sk}/D_{i1} \neq \pi/(|k_2| z_2). \qquad (4.61)$$

В противном случае $k_d = 1$.

Индуктивность $L^*_{2\mu\nu}$ по (4.52) с учетом демпфирующего действия обмотки статора равна

$$(L^*_{2\mu\nu})' = L^*_{2\mu\nu} k_\alpha k_d , \qquad (4.62)$$

а индуктивность рассеяния в воздушном зазоре клетки для гармоники ν

$$(L^*_{2\delta\nu})' = \sum_\mu (L^*_{2\mu\nu})'. \qquad (4.63)$$

Индуктивность $(L^*_{2\delta\nu})'$ можно рассчитать, использовав полную индуктивность $L^*_{2\delta\nu}$ без демпфирования по (4.39), т.е.

$$(L^*_{2\delta\nu})' = L^*_{2\delta\nu} - \sum_\mu [L^*_{2\mu\nu} - (L^*_{2\mu\nu})']. \qquad (4.64)$$

Значения индуктивности, рассчитанные по (4.63) и (4.64), могут мало отличаться друг от друга из-за ограниченного числа гармоник μ, которое учитывается в (4.63), а также входящих в (4.64) коэффициентов $k_{c\mu}$, $k_{g\nu}$ и k_{T2}.

4.5. РАСЧЕТ ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ

Определение составляющих добавочных потерь. Понятие добавочных потерь связано с методами экспериментального определения отдельных составляющих потерь АД для расчета его КПД.

Добавочные потери холостого хода измеряют вместе с основными потерями в стали. Основные потери в стали – это потери в сердечниках, вызванные основной волной магнитного поля в воздушном зазоре. Эти потери покрываются непосредственно из сети в отличие от добавочных потерь, которые покрываются механической энергией АД.

Добавочные потери при нагрузке – это по международным стандартам потери, которые получаются вычитанием из полных потерь:

механических потерь и потерь в стали, измеренных при холостом ходе;

потерь в обмотке статора, рассчитанных по сопротивлению обмотки постоянному току;

потерь в роторе, рассчитанных по измеренному скольжению.

На базе существующих методов расчета добавочных потерь и проведенных исследований разработана методика расчета добавочных потерь и составлена программа для ЭВМ. Применение методики ограничено трехфазными короткозамкнутыми АД с целым числом пазов статора на полюс и фазу и с фазной зоной обмотки 60 и 120°.

Предусмотрен расчет следующих видов потерь:

добавочных потерь холостого хода (P_{a0});

добавочных потерь при номинальной нагрузке (P_{al}), являющихся разностью полных добавочных потерь и добавочных потерь холостого ход;

добавочных потерь в режиме обратного вращения (s = 2) при номинальном токе статора ($P_{a(s=2)}$).

Третий из режимов, принятый в качестве стандартного, является наиболее распространенным при измерении добавочных потерь при нагрузке. Результаты расчета для этого режима можно сравнивать с результатами измерений и оценивать методы расчета в целом.

Методика содержит расчеты важнейших компонентов добавочных потерь, перечень которых с их обозначениями приведен ниже:

Вид потерь	Составляющие потерь
Добавочные потери при холостом ходе P_{a0}	Поверхностные потери в зубцах статора P_{s01} Пульсационные потери в зубцах статора P_{p0} Потери от потоков рассеяния лобовых частей обмоток P_{c0} Поверхностные потери в зубцах ротора P_{s02} Потери в клетке и в изоляции стержней ротора $P_{\gamma 0}$ Потери в шлице паза ротора, заполненном алюминием, P_{Al0}
Добавочные потери при нагрузке P_{al}	Поверхностные потери в зубцах статора P_{sl1} Пульсационные потери в зубцах статора P_{pl1} Потери от потоков рассеяния лобовых частей обмоток P_{cl1} Поверхностные потери в зубцах ротора P_{sl2} Потери в клетке и в изоляции стержней ротора $P_{\gamma l}$ Потери в шлице паза ротора, заполненном алюминием, P_{All} Потери в сердечнике статора от основного магнитного потока при нагрузке двигателя со скосом пазов P_{skl}
Добавочные потери при обратном вращении ротора с учетом потерь при удаленном роторе $P_{a(s=2)}$	Поверхностные потери в зубцах статора $P_{a(s=2)}$ Пульсационные потери в зубцах статора $P_{p(s=2)}$ Потери от потоков рассеяния лобовых частей обмоток $P_{c(s=2)}$ Поверхностные потери в зубцах ротора $P_{s(s=2)}$ Потери в клетке и в изоляции клетки ротора $P_{\gamma(s=2)}$ Потери в шлице паза ротора, заполненном алюминием, $P_{Al(s=2)}$

В методике не учтены те составляющие добавочных потерь, которыми, по оценке специалистов, в рассматриваемых двигателях можно пренебречь:

потери, вызванные вытеснением тока в обмотке статора;

пульсационные потери в зубцах и ярме ротора;

пульсационные потери в ярме статора;

изменение основных потерь в стали при нагрузке по сравнению с холостым ходом из-за падения напряжения в обмотке статора.

Поверхностные потери в зубцах. Поверхностные потери в зубцах статора и ротора, вызванные вихревыми токами от высших гармоник магнитного поля, выделяются в тонком слое зубцов вблизи воздушного зазора.

В методике принято, что эквивалентная глубина проникновения поля, например гармоники ν статора, в зубец ротора составляет определенную

часть n_w полюсного деления $\pi D_{i1}/|\nu|$ этой гармоники. Следовательно, поверхностные потери от ν-й гармоники возникают в объеме зубца, равном

$$V_\nu = \pi^2 D_{i1}^2 l k_{Fe} k_{T2}/(n_w|\nu|), \tag{4.65}$$

где k_{Fe} – коэффициент заполнения сердечника сталью.

Если пренебречь аксиальной составляющей индукции в зубцах из-за большого магнитного сопротивления шихтованного сердечника и принять, что радиальная составляющая индукции затухает линейно, то среднее значение тангенциальной составляющей индукции в зубце

$$B_{\nu T} = B_\nu n_w/(2\pi k_{Fe}). \tag{4.66}$$

Поверхностные потери в зубцах ротора, вызванные гармоникой статора порядка ν, равны

$$P_{s\nu} = \frac{\gamma_{Fe}}{4k_{Fe}} \frac{n_w}{|\nu|} k_{T2} k_{\nu t} D_{i1}^2 l B_\nu^2 p_{s\nu}, \tag{4.67}$$

где γ_{Fe} – плотность стали; $p_{s\nu}$ – удельные потери в стали при индукции $B_\nu = 1$ Тл с учетом подмагничивания полем основной частоты; $k_{\nu t}$ – коэффициент, учитывающий отношение длины волны статора к ширине коронки зубца ротора: $k_{\nu t} = 1$, если $|\nu| \geqslant z_2/(2k_{T2})$, и $k_{\nu t} = 1 - \cos(k_{T2}\nu\pi/z_2)$, если $|\nu| < z_2/(2k_{T2})$.

Аналогично рассчитываются поверхностные потери в зубцах статора $P_{s\mu}$, вызванные гармониками μ ротора, причем для всех μ принимается $k_{\mu t} = 1$.

В методике принято, что электромагнитное поле гармоники проникает в ротор на $1/16$ ($n_w = 16$) длины волны этой гармоники. Для ротора в уравнение (4.67) следует ввести коэффициент $k_{обр}$, учитывающий влияние способа заливки клетки ротора и способа обработки его наружной поверхности, а также вида изоляции листов и типа пазов ротора. Значения коэффициента $k_{обр}$ приведены ниже:

Заливка ротора алюминием центробежная или вибрационная; поверхность ротора не обрабатывается	1
Заливка ротора под давлением; листы сердечника не изолированы; пазы закрытые; поверхность ротора шлифованная	1,2
Заливка ротора под давлением; листы сердечника не изолированы; пазы закрытые; обработка поверхности ротора неподвижным резцом	1,75
Заливка ротора под давлением; листы сердечника не изолированы; пазы полузакрытые; обработка поверхности ротора неподвижным резцом	2,8

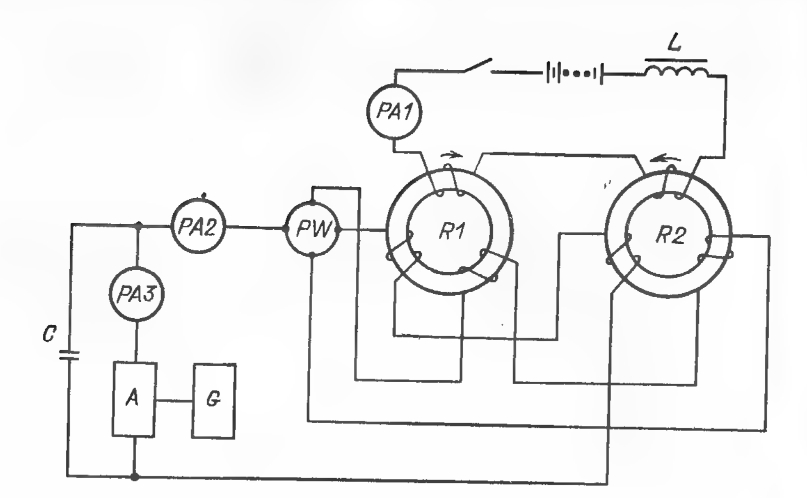


Рис. 4.5. Схема измерения удельных потерь в стали при увеличенной частоте и при подмагничивании постоянным током:

$R1$, $R2$ – сердечники из исследуемого сорта стали; G – генератор высокой частоты; A – усилитель; $PA1$, $PA2$ – амперметры постоянного и переменного тока; $PA3$ – амперметр, измеряющий ток усилителя; PW – ваттметр; C – конденсатор, компенсирующий индуктивный ток

Очень важным параметром при расчете поверхностных потерь являются удельные потери $p_{s\nu}$. При определении этого параметра необходимо учитывать, что потери возникают в зубцах при подмагничивании главным потоком, частота которого в статоре равна частоте сети f_1, а в роторе – частоте скольжения $f_2 = f_1 s$.

Для определения удельных потерь при частотах, соответствующих высшим гармоникам поля, с учетом подмагничивающего действия главного потока были проведены специальные исследования. Схема измерения представлена на рис. 4.5. Удельные потери определяют на двух кольцевых сердечниках (R_1 и R_2). На каждом сердечнике расположены три обмотки: подмагничивающая обмотка, питающаяся постоянным током; обмотка переменного тока, создающая магнитный поток соответствующей частоты; измерительная обмотка, имеющая то же число витков, что и обмотка переменного тока. Обмотки постоянного тока обоих сердечников включены встречно так, что в них не индуктируется переменная ЭДС. Полная мощность, измеренная ваттметром, соответствует потерям в сердечниках. Измерения проводились при частотах 500, 1000 и 1500 Гц и различных значениях индукции – от подмагничивающего потока вплоть до 1,7 Тл. Результаты измерений могут быть аппроксимированы формулой

Таблица 4.1

Марка стали	Страна-производитель	Свойства стали по каталогу			Измеренные параметры				
		$B_{2,5}$, Тл	B_5, Тл	p_{10}, Вт/кг	p_0, Вт/(Тл^2 × кг)	p_k, Вт/(Тл^2 × кг)	B_k, Тл	σ	$\varkappa$
FERROCOR 216	Великобритания	1,62	1,71	2,32	480	860	1,35	1,5	1,4
Ei45	ЧССР	1,52	1,62	1,8	260	520	1,4	4	1,5
Ei60	ЧССР	1,55	1,65	2,6	330	540	1,35	4	1,55
Ei70	ЧССР	1,56	1,66	3	310	638	1,3	1,7	1,6
H23R	Япония	1,56	1,69	2,7	350	404	1,35	4,2	1,4

$$p_{s\nu} = \left\{ p_0 + (p_k - p_0)\left[1 - \exp\left(-\left(\frac{B}{B_k}\right)^{\sigma}\right)\right]\right\}\left(\frac{f_\nu}{1000}\right)^{\varkappa}, \qquad (4.68)$$

где p_0 – удельные потери, Вт/кг, при частоте 1000 Гц без подмагничивания; B – индукция от подмагничивающего потока, Тл; p_k – удельные потери, Вт/кг, при частоте 1000 Гц в состоянии полного насыщения постоянным потоком; значение p_k получено по асимптоте результатов измерений для больших значений B; B_k – индукция, Тл, характерная для данного сорта стали; σ – показатель степени, определяющий зависимость потерь от индукции подмагничивающего потока; $\varkappa$ – показатель степени, учитывающий зависимость потерь от частоты переменного поля.

Значения параметров p_0, p_k, B_k, σ и $\varkappa$ для некоторых сортов электротехнической стали приведены в табл. 4.1.

Расчет поверхностных потерь при холостом ходе и при нагрузке проводился при допущении, что индукция подмагничивания в коронках зубцов равна 1 Тл. Небольшая частота этого потока по сравнению с частотой гармоник оправдывает использование значений потерь, измеренных при постоянном подмагничивающем потоке.

В режиме обратного вращения ($s = 2$) подмагничивающим потоком можно пренебречь и определить удельные потери в стали как

$$p_{s\nu} = p_0 [f_{\nu(s=2)}/1000]^{\varkappa}. \qquad (4.69)$$

Аналогично можно определить поверхностные потери от отдельных гармоник μ поля ротора.

Поверхностные потери от зубцовых гармоник поля вызваны совместным действием полей от высших гармоник МДС и магнитной проводимости, поэтому их амплитуды следует складывать согласно (4.27) при

расчете поверхностных потерь в роторе и по (4.30) при расчете поверхностных потерь в статоре. В режиме холостого хода гармоники статора определяются по (4.28), а ротор создает только поля от высших гармоник магнитной проводимости, т.е.

$$B_{\mu 0} = B_{\xi\mu}. \quad (4.70)$$

Полные поверхностные потери в зубцах ротора P_{s02} и статора P_{s01} при холостом ходе определяются суммой потерь от отдельных гармоник:

$$P_{s02} = \sum_{\nu} P_{s\nu 0}; \quad (4.71)$$

$$P_{s01} = \sum_{\mu} P_{s\mu 0}. \quad (4.72)$$

В программе расчета учитываются гармоники статора ν_f по (4.1) при $|g_1| \leqslant 3q_1$ и гармоники ротора μ_f по (4.9) при $\nu = p$ и $|k_2 \leqslant 5|$.

Как уже было отмечено, условно добавочные потери при нагрузке определяются разностью между полными добавочными потерями и добавочными потерями холостого хода. Следовательно, для определения поверхностных потерь в зубцах при нагрузке необходимо из рассчитанных потерь при номинальной нагрузке, вызванных гармониками B_ν и B_μ, вычесть поверхностные потери холостого хода, вызванные гармониками $B_{\nu 0}$ и $B_{\mu 0}$. Так как поверхностные потери пропорциональны квадрату амплитуды индукции, то удобно по вычисленным потерям $P_{s\nu 0}$ и $P_{s\mu 0}$ при холостом ходе рассчитать условные добавочные потери при нагрузке для отдельных гармоник из простых зависимостей с учетом (4.30):

$$P_{s\nu l} = P_{s\nu 0}[(B_\nu/B_{\nu 0})^2 - 1]; \quad (4.73)$$

$$P_{s\mu l} = P_{s\mu 0}(B_\mu/B_{\mu 0})^2. \quad (4.74)$$

Полные условные поверхностные потери в зубцах ротора и статора при нагрузке

$$P_{sl2} = \sum_{\nu} P_{s\nu l}; \quad (4.75)$$

$$P_{sl1} = \sum_{\mu} P_{s\mu l}. \quad (4.76)$$

Поверхностные потери в шлицах полузакрытых пазов ротора. Поверхностные потери в роторе возникают не только в коронках зубцов, но и в алюминии, заполняющем шлицы полузакрытых пазов ротора. Их природа примерно та же, что поверхностных потерь в зубцах. Поэтому для расчета этих потерь, вызванных отдельными гармониками ν статора, введена формула

$$P_{A1\nu} = 851 B_\nu^2 f_{2\nu}^{1,5} b_{c2}^2 \frac{\pi D_{i1}}{|\nu|} l z_2 (k_{g2} k_0)^2, \quad (4.77)$$

аналогичная (4.67) для расчета поверхностных потерь в зубцах ротора.

Коэффициент k_0 зависит от отношения b_{c2}/δ:

b_{c2}/δ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k_0	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4	0,38	0,35	0,32	0,31	0,3

b_{c2}/δ	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
k_0	0,28	0,27	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21	0,205	0,2	0,2

Потери при нагрузке $P_{A1\nu l}$ рассчитывают аналогично потерям в зубцах (4.73):

$$P_{A1\nu l} = P_{A1\nu 0}[(B_\nu/B_{\nu 0})^2 - 1]. \quad (4.78)$$

Суммируя потери для тех же гармоник ν, которые были учтены при расчете потерь в зубцах ротора, получаем полные потери при холостом ходе и при нагрузке:

$$P_{A1o} = \sum_{\nu} P_{A1\nu 0}; \quad (4.79)$$

$$P_{A1l} = \sum_{\nu} P_{A1\nu l}. \quad (4.80)$$

Пульсационные потери в зубцах статора. Пульсационные потери в зубцах статора возникают из-за того, что при вращении ротора поток в зубце меняется периодически от максимального значения, когда зубец статора совпадает с зубцом ротора, до минимального, когда против зубца статора находится шлиц ротора. Явление возникновения этих потерь аналогично тому, что отдельные гармоники μ ротора создают в зубцах статора потоки $\Phi_{z\mu}$, пульсирующие с частотой $f_{1\mu}$, определяемой по (4.15).

Распределение индукции B_μ в воздушном зазоре машины можно представить в виде

$$B_{\mu x} = B_\mu \cos \mu x_1. \quad (4.81)$$

Считая, что начало координат совпадает с центром паза статора, магнитный поток, проникающий в зубец статора, определяют аналогично

магнитному потоку от ν-гармоники, проходящему в зубец ротора (4.33):

$$\Phi_{1\mu} = \frac{D_{i1}}{2} l B_\mu \int_{-k_{T1}\frac{\pi}{z_1}}^{k_{T1}\frac{\pi}{z_1}} \cos \mu x_1 dx_1 = \frac{\pi D_{i1} l}{z_1} B_\mu k_{T1} \eta_{1\mu}, \quad (4.82)$$

где выражения для k_{T1} и $\eta_{1\mu}$ аналогичны (4.35) и (4.36):

$$k_{T1} = (t_1 - b_{c1})/t_1; \quad (4.83)$$

$$\eta_{1\mu} = \frac{\sin(k_{T1}\mu\pi/z_1)}{k_{T1}\mu\pi/z_1}. \quad (4.84)$$

Индукция в зубце статора

$$B_{p\mu} = \frac{\Phi_{1\mu}}{b_{z1} l k_{\text{Fe}} k_{mg1}} = \frac{t_1 k_{T1} \eta_{1\mu}}{b_{z1} k_{\text{Fe}} k_{mg1}} B_\mu, \quad (4.85)$$

где b_{z1} – ширина зубца статора в расчетном сечении.

Коэффициентом k_{mg1} учтено насыщение зубцов статора главным магнитным потоком.

Пульсационные потери в зубцах статора от гармоники μ поля ротора рассчитываются по формуле

$$P_{p\mu} = m_{z1} B_{p\mu}^2 p_{p\mu}, \quad (4.86)$$

где m_{z1} – масса зубцов статора; $p_{p\mu}$ – удельные потери с учетом подмагничивающего влияния главного потока (4.68).

Если ширина зубца не постоянна, то необходимо это учитывать: например, при трапецеидальном зубце индукция определяется в двух сечениях зубца: максимальном и минимальном (индексы 1 и 2), и в этом случае формула (4.86) принимает вид

$$P_{p\mu} = \frac{m_{z1}}{3} (B_{p\mu 1}^2 + B_{p\mu 1} B_{p\mu 2} + B_{p\mu 2}^2) p_{p\mu}; \quad (4.87)$$

$p_{p\mu}$ вычисляют по среднему значению индукции B от главного магнитного потока.

Расчет полных пульсационных потерь выполняется так же, как и расчет поверхностных потерь в статоре: сначала рассчитываются потери холостого хода $P_{p\mu 0}$, а затем – потери при номинальной нагрузке

$$P_{p\mu l} = P_{p\mu 0} (B_\mu / B_{\mu 0})^2. \quad (4.88)$$

В режиме обратного вращения ($s = 2$) главный магнитный поток очень мал и пульсационные потери вызваны только гармониками $B_{f\mu}$ от МДС ротора, а коэффициент $k_{mg1} = 1$.

Суммарные пульсационные потери при холостом ходе и при нагрузке

$$P_{p0} = \sum_\mu P_{p\mu 0}; \quad (4.89)$$

$$P_{pl} = \sum_\mu P_{p\mu l}. \quad (4.90)$$

Потери в клетке и в изоляции стержней ротора. Гармоники ν поля статора индуктируют в клетке ротора токи $I_{2\nu}$ (4.41) с частотой $f_{2\nu}$ (4.31), которые являются причиной добавочных потерь в клетке ротора. Как уже указывалось, при скосе пазов и недостаточной изоляции стержней клетки от сердечника возникают поперечные токи, протекающие по сердечнику между соседними стержнями клетки и создающие в изоляции с активным сопротивлением γ_q значительные добавочные потери.

В § 4.3 приведены формулы, представляющие распределение токов и напряжений по длине ротора, выполненного со скосом пазов.

Потери мощности, возникающие в стержнях клетки и в их изоляции от сердечника, равны

$$P_{\gamma\nu} = z_2 \operatorname{Re}\left(\int_0^l \underline{I}_\nu(y) \underline{u}_\nu^* e^{-\alpha_\nu y} dy\right), \quad (4.91)$$

где $\underline{u}_\nu^*$ – вектор, сопряженный с $\underline{u}_\nu$.

При допущениях, приведенных в § 4.3, получим формулу, принятую в методике расчетов:

$$P_{\gamma\nu} = n_p z_2 E_{2\nu}^2 \operatorname{Re}\left[\frac{2\alpha_\nu^2\left(\operatorname{ch}\frac{\gamma_\nu l}{n_p} - \cos\frac{\alpha_\nu l}{n_p}\right)}{\underline{Z}_\nu \underline{\beta}_\nu^4 \operatorname{sh}\frac{\gamma_\nu l}{n_p}} + \frac{l}{n_p R_{q\nu} \underline{\beta}_\nu^2}\right], \quad (4.92)$$

где n_p – число пакетов ротора.

Иногда для снижения потерь ротор изготовляют с двумя пакетами и промежуточным короткозамыкающим кольцом ($n_p = 2$). Для обычных роторов $n_p = 1$.

При холостом ходе ЭДС $E_{\nu 0}$ и потери $P_{\gamma\nu 0}$ вычисляют по (4.34) и (4.92) при индукции $B_{\nu 0}$ и частоте $f_{2\nu 0}$. Волновое сопротивление $\underline{Z}_\nu$ [см. (4.47)] следует рассчитывать с учетом влияния на активное и индуктивное сопротивления стержня $r_{c\nu}$ и $x_{c\nu}$ вытеснения тока, а на сопротивление рассеяния $x_{\delta\nu}$ в воздушном зазоре – демпфирования

гармоник ротора по методике, представленной в § 4.4. С учетом демпфирования из (4.38), (4.62) и (4.63) получим

$$x'_{\delta\nu} = \frac{2\pi f_{2\nu}}{4l\sin^2(\nu\pi/z_2)} \sum_{\mu} (L^*_{2\mu\nu})'. \tag{4.93}$$

Полные потери в клетке ротора и в ее изоляции при холостом ходе равны сумме потерь, вызванных отдельными гармониками порядка ν:

$$P_{\gamma 0} = \sum_{\nu} P_{\gamma\nu 0}. \tag{4.94}$$

В программе расчет производится для гармоник тех же порядков ν, что и при вычислении поверхностных потерь в роторе.

Потери от отдельных гармоник при номинальной нагрузке рассчитывают пропорционально потерям холостого хода, т.е.

$$P_{\gamma\nu l} = P_{\gamma\nu 0} \frac{B^2_{\nu l} - B^2_{\nu 0}}{B^2_{\nu 0}}, \tag{4.95}$$

а полные потери при нагрузке

$$P_{\gamma l} = \sum_{\nu} P_{\gamma\nu l}. \tag{4.96}$$

Для сравнения с результатами измерения потерь при обратном вращении рассчитывают также потери $P_{\gamma(s=2)}$ при индукции, рассчитанной по (4.29), и частоте $f_{2\nu} = f_1 |1 + \nu/p|$.

Самым трудным при расчете потерь P_γ является правильное определение сопротивления γ_q изоляции клетки. Это сопротивление зависит от многих производственных факторов, главным образом от типа изоляции листов, способов заливки ротора алюминием и окончательной обработки наружной поверхности сердечника ротора.

Следовательно, на разных заводах в зависимости от применяемых материалов и технологии производства различны и значения γ_q и, следовательно, P_γ. Из-за этого в программе предусмотрена возможность выполнения расчетов при нескольких значениях γ_q. Сравнение результатов расчетов с результатами измерений добавочных потерь АД, изготовленных по определенной технологии, позволяет подобрать соответствующие значения сопротивления γ_q.

В качестве примера на рис. 4.6 представлены результаты расчета потерь P_γ по методике Интерэлектро при холостом ходе, при номинальной нагрузке и в режиме обратного вращения для четырехполюсного АД мощностью 22 кВт со скосом пазов ротора на одно зубцовое деление. Расчеты выполнены по программе Интерэлектро для нескольких значений γ_q.

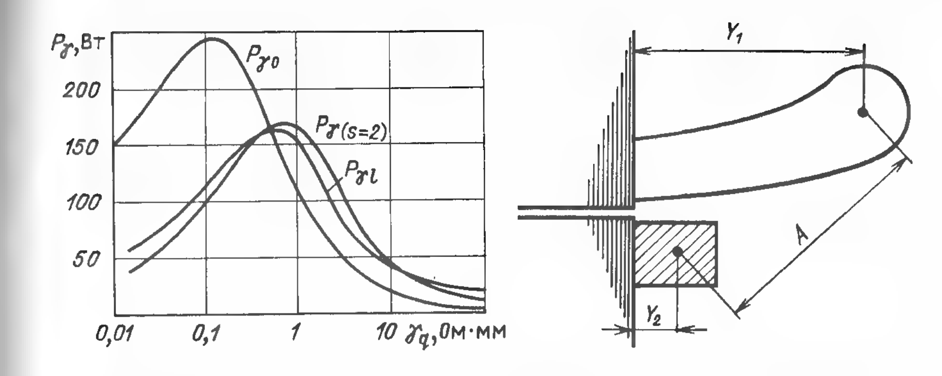


Рис. 4.6. Зависимость $P_\gamma = f(\gamma_q)$

Рис. 4.7. К расчету потерь от полей рассеяния лобовых частей обмотки

Экспериментально установлено, что для АД малых мощностей с заливкой ротора алюминием под давлением $\gamma_q \approx 1$ Ом·мм и для АД средней мощности с центробежной заливкой ротора $\gamma_q \approx 10$ Ом·мм.

Потери от потоков рассеяния лобовых частей обмоток. Потоки рассеяния вокруг лобовых частей обмоток вызывают вихревые токи в конструкционных частях АД, главным образом в торцевых частях сердечников, а также в подшипниковых щитах, станине и т.д.

Расчет распределения потоков рассеяния вокруг лобовых частей и вызванных ими вихревых токов очень сложен, а конструкция АД разных габаритов, произведенных на разных заводах, различна. По этим причинам очень трудно разработать простую методику, по которой можно было бы рассчитать с удовлетворительной точностью потери от потоков рассеяния лобовых частей. Обычно эти потери в двигателях малых и средних мощностей по проведенным измерениям не превосходят 7% всех добавочных потерь.

До разработки более точных методов можно применять известную формулу

$$P_{cl} = 42{,}5 \cdot 10^{-7} f \frac{D_{i1}}{p^2} w_1^2 I_1^2 \lg\left(1 + \frac{A}{4Y_1Y_2}\right). \tag{4.97}$$

Обозначения размеров A, Y_1 и Y_2 – по рис. 4.7.

Формула (4.97) выведена в предположении, что добавочные потоки от лобовых частей можно приблизительно определить, умножив реактивную мощность, связанную с аксиальной составляющей потоков рассеяния лобовых частей, на $\mathrm{tg}\,\varphi = 0{,}3$. Принято, что эта аксиальная составляющая вызвана токами статора и ротора, которые протекают по окружностям, концентричным оси вращения АД. Индуктивные сопротивления

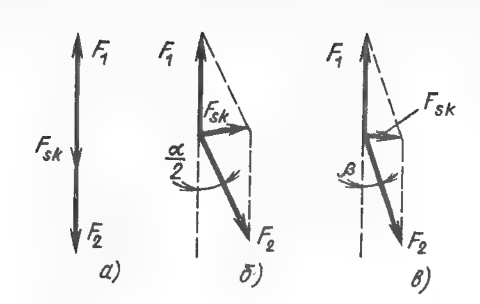


Рис. 4.8. МДС обмотки статора F_1, обмотки ротора F_2 и результирующая F_{sk}:

а – на середине длины сердечника; *б* – у края сердечника; *в* – на расстоянии y от середины сердечника

при этом можно рассчитать на основе известных формул для концентрических катушек, расположенных вблизи ферромагнитных плоскостей. Так как на стадии предварительных расчетов размеры обмоток обычно не известны, то для упрощения полагаем $Y_1 = A$ и $Y_2 = A/4$. Тогда (4.97) принимает вид

$$P_{cl} = 12{,}8 \cdot 10^{-7} f \frac{D_{i1}}{p^2} w_1^2 I_1^2. \qquad (4.98)$$

В программе сначала вычисляют добавочные потери P_{c0} при токе холостого хода I_0, а затем – потери при номинальной нагрузке

$$P_{cl} = P_{c0}[(I_1/I_0)^2 - 1] \qquad (4.99)$$

и при обратном вращении

$$P_{c(s=2)} = P_{c0}(I_2'/I_0)^2, \qquad (4.100)$$

где ток I_2' рассчитывают по (4.12).

Потери в сердечнике статора, вызванные скосом пазов. В АД без скоса пазов результирующая МДС и индукция в воздушном зазоре одинаковы по всей длине машины. При нагрузке и пренебрежении намагничивающим током МДС статора F_1 и ротора F_2 направлены противоположно и равны друг другу, а при скосе пазов ротора F_2 сдвинута относительно F_1 на фазный угол, изменяющийся по длине машины (рис. 4.8), при этом

$$F_2 = F_1/k_{sk}, \qquad (4.101)$$

где

$$k_{sk} = \frac{\sin(\alpha/2)}{\alpha/2}; \qquad (4.102)$$

$$\alpha = \frac{b_{sk}}{t_1} \frac{2\pi p}{z_1}. \qquad (4.103)$$

МДС статора и ротора на расстоянии y от середины сердечника сдвинуты на угол

$$\beta = \alpha 2y/l. \qquad (4.104)$$

Результирующая МДС F_{sk} вызывает добавочный магнитный поток рассеяния, который протекает по той же самой магнитной цепи, что и главный поток.

Как следует из рис. 4.8,

$$F_{sky} = \sqrt{(F_1 - F_2\cos\beta)^2 + F_2^2\sin^2\beta} = F_2\sqrt{(k_{sk} - \cos\beta)^2 + \sin^2\beta}. \qquad (4.105)$$

При небольшом скосе пазов можно принять $\cos\beta \approx 1$, а функцию синуса заменить аргументом. Учитывая (4.101), получаем

$$F_{sky} = F_2\beta = F_2 \frac{b_{sk}}{t_1} \frac{4\pi p}{z_1} \frac{y}{l}. \qquad (4.106)$$

Если принять, что потери в стали пропорциональны B^2, то при небольшом насыщении они пропорциональны также F^2. Так как при нагрузке

$$F_2 = F_{10}\frac{I_2'}{I_0}, \qquad (4.107)$$

то отношение добавочных потерь P_{sk}, вызванных скосом, к потерям холостого хода P_{Fe} на расстоянии y от края сердечника будет

$$\frac{P_{sk}}{P_{\text{Fe}}} = \left(\frac{F_{sky}}{F_{10}}\right)^2 = \left(\frac{b_{sk}}{t_1}\frac{4\pi p}{z_1}\frac{y}{l}\right)^2 \left(\frac{I_2'}{I_0}\right)^2. \qquad (4.108)$$

Для всего сердечника

$$P_{sk} = P_{\text{Fe}}\left(\frac{I_2'}{I_0}\right)^2 \left(\frac{b_{sk}}{t_1}\frac{4\pi p}{z_1 l}\right)^2 \int_0^{l/2} y^2\,dy = \frac{\pi^2}{3} P_{\text{Fe}}\left(\frac{b_{sk} p I_2'}{t_1 z_1 I_0}\right)^2. \qquad (4.109)$$

Если сердечник ротора разделен на n частей с промежуточными короткозамыкающими кольцами, то

$$P_{sk} = \frac{\pi^2}{3}\frac{P_{\text{Fe}}}{n}\left(\frac{b_{sk} p I_2'}{t_1 z_1 I_0}\right)^2. \qquad (4.110)$$

МДС F_{sk} от скоса пазов вызывает также магнитный поток вдоль сердечника, но этот поток из-за изоляции между листами незначителен, и вызванных им потерь можно не учитывать.

В режиме обратного вращения потерями в стали от скоса пазов можно пренебречь.

4.6. РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ ДОБАВОЧНЫХ МОМЕНТОВ

Асинхронный момент и соответствующая ему мощность передаются от статора через воздушный зазор в ротор и связаны с потерями мощности в роторе. При идеальной изоляции стержней от сердечника ротора потери возникают только в клетке, а если пренебречь сопротивлением короткозамыкающих колец, — то только в стержнях клетки. При замещении клетки контурами (см. рис. 4.3) мощность, передаваемая потоком ν-й гармоники через зазор, равна

$$P_{\delta\nu} = z_2 R^*_{2\nu} (I^*_{2\nu})^2 / s_\nu, \tag{4.111}$$

а соответствующий этой мощности вращающий момент

$$M_\nu = \nu P_{\delta\nu} / \omega. \tag{4.112}$$

Максимальное (критическое) значение асинхронного момента достигается, как известно, при скольжении

$$s_{cr\nu} = \frac{R^*_{2\nu}}{\omega (L^*_{z2\nu} + L^*_{\delta\nu})}. \tag{4.113}$$

Подставляя (4.113) в (4.111) и используя (4.34) и (4.40), получаем на основе (4.112)

$$M_{cr\nu} = \frac{\nu}{4 z_2} \frac{(\pi D_{i1} l B_\nu k'_{T2} \eta^2_{2\nu})^2}{L^*_{z2\nu} + L^*_{\delta\nu}}. \tag{4.114}$$

Если изоляция стержней несовершенна и возникают поперечные токи I_q, асинхронные моменты от отдельных гармоник ν поля статора определяют из общих потерь $P_{\gamma\nu}$ в роторе по (4.92):

$$M_\nu = \frac{\nu}{\omega} \frac{P_{\gamma\nu}}{s_\nu}. \tag{4.115}$$

Результирующий вращающий момент АД при данной частоте вращения равен сумме моментов гармоник при этой частоте:

$$M = \sum_\nu M_\nu. \tag{4.116}$$

Программа расчета асинхронных моментов разработана специалистами Интерэлектро. Для выбранных значений скольжения s определяют ток статора I_1 и амплитуду основной волны индукции B_g в воздушном зазоре. Результирующие амплитуды индукций гармоник поля ν зубцового порядка статора рассчитывают по формуле (4.27), складывая амплитуды гармоник магнитного напряжения (4.4) и магнитной проводимости (4.23) с учетом их знака (4.26).

Для остальных гармоник ν_f статора, для которых

$$k_1 = g_1/q_1 \neq \text{целое число},$$

составляющие магнитной проводимости отсутствуют.

Токи $I^*_{2\nu}$ отдельных гармоник в роторе без скоса пазов вычисляют с учетом демпфирующего действия обмотки статора. Если имеется скос пазов ротора, необходимо учитывать поперечные токи и суммарные потери в роторе (4.92). При этом расчет усложняет неопределенное значение сопротивления γ_q.

Для сокращения расчетов в сумме (4.112) учитывают гармоники статора, для которых $|g_1| \leqslant q_1$ (см. § 4.1 и 4.2).

Если также для рассматриваемой гармоники

$$|\eta'_{2\nu} k_{w\nu}| < 0{,}04,$$

то расчет прекращают и переходят к следующему значению g_1.

При определении демпфирующего действия обмотки статора на гармоники ротора (расчет $L_{\delta\nu}$) учитываются только гармоники, для которых в формуле (4.9) $|k_2| \leqslant 5$.

Самым главным вопросом при расчете асинхронных моментов является правильный учет влияния насыщения путей потоков рассеяния, вызванного большим током при пуске АД. Разные методы расчета этого влияния, примененные в промежуточных программах, не дали вполне удовлетворительных результатов. Окончательно вопрос не был решен. Предусмотрено применение трех коэффициентов насыщения: k_{c1}, k_{c2} и k_{mg}, определенных формулами

$$b'_{c1} = k_{c1} b_{c1}; \tag{4.117}$$

$$b'_{c2} = k_{c2} b_{c2}; \tag{4.118}$$

$$\delta' = k_{mg} \delta. \tag{4.119}$$

Программе не содержит способов расчета этих коэффициентов.

4.7. РАСЧЕТ СИНХРОННЫХ МОМЕНТОВ

Синхронный момент возникает в результате взаимодействия гармоники статора ν_b и гармоники ротора μ_a, вызванной отличной от ν_b гармоникой статора ν_a. Необходимым условием возникновения синхронного момента является равенство порядков ν_b и μ_a, т.е.

$$|\nu_b| = |\mu_a|.$$

Распределение индукции гармоники поля μ_a по окружности ротора в зависимости от времени выражается в виде

$$b_{\mu a}(x_2, t) = B_{\mu a} \cos(s_\nu \omega_1 t - \mu_a x_2 - \rho_{2\nu a}), \tag{4.120}$$

где амплитуда $B_{\mu a}$ может быть определена на основе (4.10) и с учетом (4.9) и (4.37):

$$B_{\mu a} = (-1)^{k_2} \sqrt{2}\, \frac{\mu_0}{\delta k_{g\,\nu a} k_{mg}} \frac{\nu_a}{\mu_a} k'_{c\mu} \eta'_{2\nu a} I^*_{2\nu a}, \tag{4.121}$$

а $\rho_{2\nu a}$ – фазовый сдвиг тока ротора $I^*_{2\nu a}$ относительно тока I_1, создающего гармоники МДС статора. Зависимость (4.120) приводится к системе координат статора преобразованием

$$x_1 = x_2 + \frac{\omega_1}{p}(1 - s)t. \tag{4.122}$$

Подставляя (4.122) в (4.120), получаем

$$b_{\mu a}(x_1, t) = B_{\mu a} \cos\left\{\left[1 + \frac{\mu_a - \nu_a}{p}(1 - s)\right]\omega_1 t - \mu_a x_1 - \rho_{2\nu a}\right\}. \tag{4.123}$$

С этой гармоникой взаимодействует в создании синхронного момента гармоника ν_b, линейная плотность тока которой изменяется по закону

$$a_{\nu b}(x_1, t) = -A_{\nu b} \sin(\omega_1 t - \nu_b x_1) \tag{4.124}$$

с амплитудой

$$A_{\nu b} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} \frac{I_1 w_1 k_{w\nu b}}{D_{i1}}. \tag{4.125}$$

Синхронный момент, создаваемый гармониками μ_a и ν_b, получается интегрированием произведения $a_{\nu b} b_{\mu a}$ по всей внутренней поверхности статора:

$$M_{\mu a \nu b}(t) = \frac{D_{i1}^2 l}{4} \int_0^{2\pi} a_{\nu b} b_{\mu a} dx_1 =$$

$$= \frac{D_{i1}^2 l}{4} A_{\nu b} B_{\mu a} \left\{ \int_0^{2\pi} \sin\left[\frac{\mu_a - \nu_a}{p}(1 - s)\omega_1 t - (\mu_a - \nu_b)x_1 - \right.\right.$$

$$\left. - \rho_{2\nu a}\right] dx_1 + \int_0^{2\pi} \sin\left[\left(\frac{\mu_a - \nu_a}{p}(1 - s) + 2\right)\omega_1 t - \right.$$

$$\left.\left. - (\mu_a + \nu_b)x_1 - \rho_{2\nu a}\right] dx_1 \right\}. \tag{4.126}$$

Первый интеграл принимает значение, отличное от нуля, только для $\mu_a - \nu_b = 0$, второй – только для $\mu_a + \nu_b = 0$. В первом случае интеграл равен

$$2\pi \sin\left[\frac{\mu_a - \nu_a}{p}(1 - s)\omega_1 t - \rho_{2\nu a}\right], \tag{4.127}$$

а во втором

$$-2\pi \sin\left[\left(\frac{\mu_a - \nu_a}{p}(1 - s) + 2\right)\omega_1 t - \rho_{2\nu a}\right]. \tag{4.128}$$

Из зависимостей (4.127) и (4.128) видно, что при произвольной частоте вращения этот момент знакопеременный со средним значением, равным нулю. Частота момента равна в первом случае

$$f_{M(-)} = f_1\left[\frac{\mu_a - \nu_a}{p}(1 - s)\right] = f_1\left[\frac{k_2 z_2'}{p}(1 - s)\right], \tag{4.129}$$

а во втором

$$f_{M(+)} = f_1\left[\frac{k_2 z_2}{p}(1 - s) + 2\right]. \tag{4.130}$$

Момент постоянен ($f_M = 0$) только при одной, синхронной частоте вращения. Эта частота вращения в первом случае (при $\mu_a - \nu_a = 0$) равна $n_{sa} = 0$ ($s = 1$), во втором (при $\mu_a + \nu_a = 0$)

$$n_{sa} = -2pn_s/(k_2 z_2). \tag{4.131}$$

В обоих случаях максимальный момент одинаков и равен

$$M_{m\mu\nu} = \frac{\pi}{4} D_{i1}^2 l A_{\nu b} B_{\mu a}. \tag{4.132}$$

6–6983

Если в роторе имеется скос пазов, формула (4.132) принимает вид

$$M_{m\mu\nu} = \frac{\pi}{4} D_{i1} l A_{\nu b} B_{\mu a} k_{sk\nu a} k_{sk\mu a}, \tag{4.133}$$

где коэффициент

$$k_{sk\nu a} = \frac{\sin(\nu_a b_{sk}/D_{i1})}{\nu_a b_{sk}/D_{i1}} \tag{4.134}$$

учитывает влияние скоса пазов на значение тока ротора $I^*_{2\nu a}$ и амплитуды индукции гармоники μ_a, а коэффициент

$$k_{sk\mu a} = \frac{\sin(\mu_a b_{sk}/D_{i1})}{\mu_a b_{sk}/D_{i1}} \tag{4.135}$$

учитывает влияние скоса на взаимодействие гармоник μ_a ротора и ν_b статора.

Из (4.127) и (4.128) видно, что и в первом, и во втором случае зависимость от времени относится не только к одной паре гармоник ($|\mu_a| = |\nu_b|$ и ν_a), но к бесконечному числу пар (μ_a, ν_a), для которых

$$\mu_a - \nu_a = k_2 z_2. \tag{4.136}$$

Значения фазового угла $\rho_{2\nu a}$ для отдельных пар гармоник могут отличаться друг от друга, но обычно это различие невелико и им можно пренебречь. При этом предположении результирующий синхронный момент при неподвижном роторе ($n_{sa} = 0$), а также при синхронных скоростях по (4.131) получается алгебраическим суммированием моментов отдельных пар гармоник (μ_a, ν_b) с целым положительным и отрицательным значением k_2 (4.136). Условие возникновения синхронных моментов удобнее выразить с учетом зависимостей (4.2) и (4.9), а именно: в первом случае $(\mu_a - \nu_a = 0)$

$$g' = g_b - g_a = k_2 z_2/(6p) = \text{целое число} \tag{4.137}$$

и во втором случае $(\mu_a + \nu_a = 0)$

$$g' = g_b + g_a = (k_2 z_2 + 2p)/(-6p) = \text{целое число.} \tag{4.138}$$

В разработанной методике значения k_2 ограничены до четырех (−1, +1, −2, +2), а значения g' – до $|g'| \leqslant 2q_1$.

Синхронные моменты менее опасны при пуске АД, чем асинхронные, так как они действуют кратковременно, при прохождении частоты вращения через n_{sa}, и из-за кинетической энергии ротора редко вызывают

застревание ротора даже при существенном их значении. Однако синхронные моменты очень трудно рассчитать точно. На их значение сильно влияют насыщение зубцовой зоны, которое различно по длине окружности сердечников, а также поперечные токи при неизолированных стержнях ротора. Поэтому разработанная методика упрощена и ее целью является приближенное определение синхронных моментов для привлечения внимания конструктора при их чрезмерно большом значении.

Таким образом, в разработанной методике решено отказаться от точного учета влияния поперечных токов в роторе на уменьшение эффективности скоса пазов ротора. Введено приблизительное значение эффективного скоса

$$b_{sk\,\text{эф}} = (0{,}66 \div 0{,}75)\, b_{sk}.$$

Для упрощения не учитываются гармоники магнитной проводимости, а также демпфирующее действие обмотки статора на гармоники μ ротора. По тем же причинам для синхронных моментов в окончательной версии программы введены, так же как для асинхронных моментов, три коэффициента для учета влияния насыщения. Вопрос определения их значения остается открытым.

4.8. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СНИЖЕНИЮ ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ И МОМЕНТОВ

Вопросы снижения добавочных потерь и моментов давно интересовали специалистов по АД. Ввиду сложности этих явлений и влияния на них различных конструктивных и технологических факторов многие вопросы остаются до сих пор не вполне выясненными. Были проведены исследования по снижению добавочных потерь и моментов. Программа исследований предусматривала:

теоретическое обоснование и исследование эффективности ограничения добавочных потерь и моментов при введении промежуточного короткозамыкающего кольца в роторе;

исследование способов увеличения переходного сопротивления между клеткой и сердечником ротора и их влияния на добавочные потери и моменты;

исследование эффективности снижения добавочных потерь применением закрытых пазов ротора;

выбор способа заливки ротора для снижения добавочных потерь;

определение эффективности снижения добавочных потерь путем различных технологических мероприятий (обработка ротора вращающимся резцом, термообработка и т.д.).

Одним из конструктивных способов уменьшения добавочных потерь и моментов в АД являются промежуточные короткозамыкающие кольца в роторах с алюминиевой литой клеткой. На рис. 4.9 показана

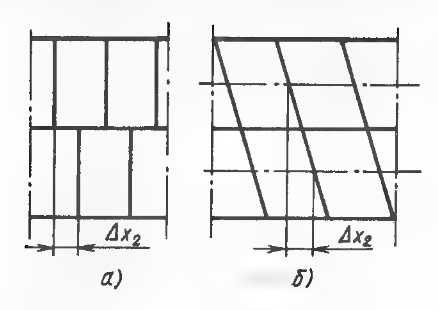


Рис. 4.9. Клетки с промежуточным короткозамыкающим кольцом:

а – с прямыми пазами; *б* – со скосом пазов

схема клетки с промежуточным кольцом, помещенным посредине сердечника ротора. Применение промежуточных колец связано с рядом технологических трудностей: удалением зубцов посредине длины сердечника для размещения кольца, изменением кокиля для заливки ротора алюминием и т.д.

В роторе с прямыми пазами (рис. 4.9,*а*) из-за промежуточного кольца поля гармоник μ ротора сдвинуты в отдельных частях ротора относительно друг друга на фазный угол $\epsilon\mu$. Эти поля индуктируют в обмотке статора две составляющие напряжения, сдвинутые на тот же угол. Для того чтобы результирующее напряжение равнялось нулю, необходимо, чтобы $\epsilon_\mu = \pm\pi$. Это условие для гармоник ротора, порядок которых соответствует определенному значению k_2 (4.9), требует смещения пазов в двух половинах ротора (рис. 4.9,*а*) на

$$\Delta x_2 = \pi/(|k_2| z_2). \qquad (4.139)$$

В этом случае полностью исключаются синхронные моменты от всех гармоник ротора, порядок которых соответствует k_2, так как моменты, вызванные этими гармониками, в отдельных половинах ротора направлены навстречу друг другу.

Для получения удовлетворительных результатов при очень большом порядке гармоник необходимо точное смещение двух половин ротора на Δx_2, что по технологическим причинам бывает сделать очень трудно.

Значительно удобнее совместное применение промежуточного кольца и скоса пазов (рис. 4.10,*б*). При скосе пазов на одно зубцовое деление ротора получается смещение осей двух "полуклеток" на половину зубцового деления ротора. При таком конструктивном решении полностью исключается действие гармоник μ при $|k_2| = 1$, для которых влияние самого скоса пазов мало эффективно, компенсируются синхронные моменты при $|k_2| = 1$, а также отсутствует демпфирующее действие обмотки статора на эти гармоники, что препятствует увеличению асинхронных паразитных моментов. При этом на гармоники малых порядков (в том числе и на основную гармонику) ротор с промежуточным кольцом действует как ротор со скосом, равным половине зубцового деления. Вследствие этого значительно уменьшается отрицательное влияние скоса пазов на добавочные потери в изоляции клетки ротора и в сердечнике статора, как это следует из (4.92) и (4.110).

Приведенные выводы подтверждены измерениями добавочных моментов четырехполюсных АД мощностью 22 кВт. Эти АД с числом пазов статора $z_1 = 48$ и с обмоткой статора, соединенной в треугольник, были испытаны с роторами, имеющими $z_2 = 52$, 54 и 40. Было изготовлено по два экземпляра ротора в разных исполнениях: с прямыми пазами, со скосом пазов $b_{sk} \approx 0{,}85 t_1$, а также со скосом пазов и с промежуточным кольцом по рис. 4.9,*б*.

В двигателях с $z_2 = 52$ и с прямыми пазами наблюдались большие асинхронные моменты от гармоник ($\nu = -46$ и $\nu = 50$). Кроме того, появлялся значительный синхронный момент для $k_2 = -1$ при частоте вращения $n = 115$ об/мин, который при пониженном напряжении (соединение обмотки в звезду) вызывал застревание АД при пуске, а также значительный синхронный момент для $k_2 = 2$ при $n = -57$ об/мин. Вследствие применения скоса пазов синхронные моменты почти полностью исчезают, но увеличиваются асинхронные моменты из-за поперечных токов в роторе. В АД с промежуточным кольцом синхронные моменты такие же, как в АД со скосом пазов ротора, а асинхронные моменты, особенно от гармоники $\nu = -46$, меньше примерно на 35%. Последнее явление вызвано не только меньшим влиянием поперечных токов из-за меньшего эффективного скоса, но также ограниченным демпфирующим действием обмотки статора на гармонику $\mu = 6$ ротора.

В АД с числом пазов $z_2 = 54$ незначительны синхронные моменты, а асинхронные моменты, особенно моменты от гармоники $\nu = -46$, ограничиваются использованием промежуточного кольца примерно на 30%, как для роторов с $z_2 = 52$.

Сумма добавочных потерь (при холостом ходе и нагрузке) уменьшается при использовании ротора с промежуточным кольцом для обоих чисел пазов ротора ($z_2 = 52$ и 54) в среднем на 10% по сравнению с роторами со скосом пазов.

Для серийного ротора ($z_2 = 40$) со скосом пазов и с промежуточным кольцом получены малые добавочные моменты и удовлетворительные добавочные потери.

Для уменьшения добавочных потерь часто применяют закрытые пазы ротора. Проведены исследования для АД разных мощностей с закрытыми и полузакрытыми пазами ротора. Как было показано выше, при закрытых пазах устраняются поверхностные потери в шлицах ротора, заполненных алюминием, и уменьшаются поверхностные и пульсационные потери в статоре. По проведенным исследованиям на АД мощностью от 2,2 до 90 кВт полные добавочные потери при переходе с полузакрытых на закрытые пазы уменьшаются в среднем на 30%.

Однако закрытие пазов приводит к некоторому снижению коэффициента мощности (в среднем на 0,009 в четырехполюсных и на 0,025 в шестиполюсных АД) и как следствие – к росту потерь в обмотке статора, но при этом действительный КПД повышается на 0,2–2% (для четырехполюсных АД в среднем на 1,4%), а превышение температуры обмотки статора уменьшается на 3–13 °С (в среднем на 7 °С).

По проведенным исследованиям на двух- и четырехполюсных АД с высотами оси вращения 95 и 160 мм, мощностью от 4,5 до 18 кВт полные добавочные потери уменьшаются на 30–55% (в среднем на 43%). Измерение добавочных потерь на четырехполюсных АД с высотами оси вращения 100 и 200 мм показало, что в среднем получено снижение добавочных потерь на 27%, коэффициента мощности – на 0,02–0,04, начального пускового тока – на 2–13%, а начального пускового момента – на 4–16%.

Из всех проведенных исследований вытекает, что применение закрытых пазов вместо полузакрытых вызывает значительное снижение добавочных потерь. Если высота мостиков выбрана так, что это не приводит к слишком большому уменьшению коэффициента мощности, то снижение полных добавочных потерь (главным образом потерь холостого хода) составит примерно 25%. Положительной стороной применения закрытых пазов является также некоторое снижение затрат на производство, прежде всего за счет заливки роторов алюминием, а недостатком – вероятность значительного разброса параметров АД даже при малых отклонениях в размерах мостиков, закрывающих пазы ротора. Кроме того, уменьшается коэффициент мощности и в некоторой степени – начальный пусковой момент.

Из (4.92) вытекает зависимость потерь, вызванных токами гармоники ν в клетке ротора, от сопротивления γ_q изоляции между соседними стержнями (рис. 4.10). Начиная от значения $\gamma_q = 0$ потери

$$P_{\gamma\nu 0} = z_2 I_{2\nu}^2 R_{c\nu} l \tag{4.140}$$

растут сразу линейно, достигают максимального значения, а затем уменьшаются приблизительно по гиперболе и стремятся при $\gamma_q \to \infty$ к значению

$$P_{\gamma\nu\infty} = z_2 I_{2\nu}^2 R_{c\nu} l k_{sk\nu}^2, \tag{4.141}$$

где $k_{sk\nu}$ – коэффициент скоса для гармоники ν:

$$k_{sk\nu} = \frac{\sin\left(\dfrac{\alpha_\nu}{2} l\right)}{\dfrac{\alpha_\nu}{2} l}, \tag{4.142}$$

причем α_ν определяется по (4.42).

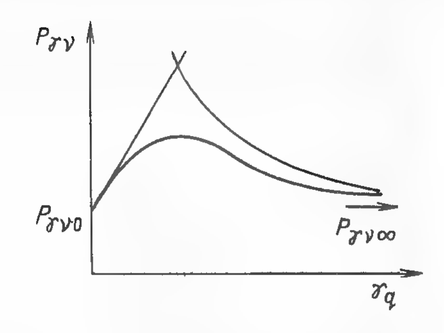


Рис. 4.10. Зависимость потерь в клетке ротора от сопротивления γ_q изоляции между соседними стержнями единичной длины

Для того чтобы уменьшить потери $P_{\gamma\nu}$ без потери положительных эффектов от скоса пазов, необходимо стремиться к возможно большему значению сопротивления γ_q (правая часть характеристики на рис. 4.10). Однако, если исходное значение γ_q таково, что потери определяются левой частью характеристики, увеличение переходного сопротивления приводит к увеличению добавочных потерь.

Имеется много способов увеличения переходного сопротивления между клеткой и сердечником ротора. Некоторые из них в значительной степени усложняют технологию производства АД и нецелесообразны. До заливки ротора алюминием можно изолировать листы ротора после штамповки применением оксидирования или фосфатирования. После заливки увеличение переходного сопротивления достигается термической обработкой ротора. Нагретый до температуры 400 – 550 °С ротор охлаждается в воде или на воздухе, вследствие чего происходит отрыв стержней от стенок паза.

Значительное влияние на переходное сопротивление оказывает также способ заливки ротора.

Окончательная механическая обработка внешней поверхности ротора влияет не только на изменение в некоторой степени сопротивления γ_q и связанных с ним потерь, но также на другие составляющие добавочных потерь, главным образом на поверхностные потери в коронках зубцов и в алюминии, находящемся в шлицах пазов.

Подробное исследование влияния сопротивления изоляции клетки ротора на добавочные потери, моменты и другие характеристики АД было проведено на 24 типах АД мощностью до 100 кВт. Эти испытания показали, что добавочные потери максимальны при сопротивлениях изоляции клетки ротора $(1 \div 7) \cdot 10^{-3}$ Ом · мм, а добавочные моменты максимальны при сопротивлениях $(0{,}1 \div 1) \cdot 10^{-3}$ Ом·мм. При увеличении сопротивления примерно до значения 1 Ом · мм полные добавочные потери существенно снижаются, а затем практически не изменяются. Для сердечников роторов, собранных из изолированных листов стали, при числе пазов ротора меньшем, чем число пазов статора, добавочные потери уменьшились в среднем на 20%, а температура обмотки статора снизилась на 5 °С. При применении неизолированных листов ротора полу-

чено уменьшение добавочных потерь на 34% и понижение температуры обмотки статора на 7 °С. Еще большее влияние изоляции клетки ротора на добавочные потери наблюдается в случае, если число пазов ротора больше, чем число пазов статора. При отсутствии изоляции листов получено снижение добавочных потерь на 50% и температуры обмотки статора на 9 °С. Фактический КПД увеличивается при этом в среднем на 1,5%.

Применение вибрационной или центробежной заливки вместо заливки под давлением вызывает оксидирование листов при предварительном их нагреве и увеличение сопротивления клетки ротора. В АД со скосом пазов получено уменьшение полных добавочных потерь при переходе с заливки под давлением на другие виды заливок: при $z_2/z_1 < 1$ – в среднем на 12% и при $z_2/z_1 > 1$ – на 35%.

Были также проведены исследования влияния термообработки залитого ротора на добавочные потери после нагрева ротора до 525 ± 25 °С и охлаждения его в воде или на воздухе. В АД серии АО2, в которых $z_2/z_1 > 1$ и применена горячекатаная сталь без специальной изоляции, после термообработки получено уменьшение добавочных потерь на 1/6 и температуры статора – в среднем на 6 °С. В АД серии 4А, в которых применяется холоднокатаная сталь и оксидирование после штамповки, термообработка залитого ротора эффекта почти не дала.

Было также проведено исследование влияния переходного сопротивления между клеткой и сердечником ротора на добавочные потери для АД габаритов 100 и 160. Сердечники были изготовлены из изолированных листов слаболегированной стали. Повышение сопротивления было получено путем термического отрыва стержней от сердечника, а в АД габарита 160 – также и путем оксидирования. Термический удар был достигнут погружением залитого и предварительно нагретого до температуры 400 °С ротора в воду. Это увеличило переходное сопротивление примерно в 1,7 раза в АД габарита 160 и в среднем в 5,7 раза в АД габарита 100. Применение оксидирования листов привело к небольшому, в 1,2 раза, увеличению сопротивления. Измерения добавочных потерь показали, что применение термообработки ротора несколько уменьшает (в среднем на 15%) добавочные потери. Еще меньший эффект получается при оксидировании листов после штамповки вместо термического удара.

Состояние внешней поверхности ротора имеет значительное влияние на добавочные потери. Как уже было отмечено, от этого зависят поверхностные потери, а также потери от поперечных токов между стержнями ротора при скосе пазов. Особенно важно, чтобы при окончательной обработке внешней поверхности ротора не возникали заусенцы между отдельными листами ротора и чтобы алюминий из полузакрытых пазов не размазывался на поверхности ротора. Форма резца и применяемая подача играет важную роль.

Хорошие результаты получены при обработке самовращающимися резцами. Применение этих резцов вместо обычных привело к повышению фактического КПД на 0,4 – 1,6% в АД серии АО2 и на 0,25 – 0,75% на ряде типов АД серии 4А. Меньшая эффективность для АД серии 4А объясняется применением процесса оксидации листов ротора после штамповки.

Исследования по методам снижения добавочных потерь и моментов дали результаты, которые были использованы при разработке АД серии АИ. Следует заметить, что исследованные явления сложны и зависят от многих конструктивных, материальных и технологических факторов.

Так как в отдельных странах и на разных заводах применяются различные материалы и технологические процессы, результаты измерений, проведенных в отдельных странах, даже при похожих конструктивных решениях могут значительно различаться. Это видно, например, на полученных значениях поперечного сопротивления γ_q, измеренного одним и тем же методом.

Однако выводы из проведенных исследований, которые можно считать достоверными для всех условий, следующие:

применение числа пазов ротора меньшего, чем число пазов статора, является полезным с точки зрения как добавочных потерь, так и добавочных моментов;

применение промежуточного короткозамыкающего кольца вместе со скосом пазов в роторе связано с некоторыми технологическими трудностями, но положительно влияет на снижение действия высших гармоник поля: уменьшаются добавочные потери и наиболее опасные синхронные моменты, а иногда происходит и уменьшение асинхронных моментов;

закрытые пазы ротора, примененные в двух- и четырехполюсных АД, приводят к уменьшению добавочных потерь без заметного ухудшения эксплуатационных параметров при условии правильного подбора размеров мостика;

в роторах, изготовленных из изолированных листов, значительное увеличение поперечного сопротивления в массовом производстве является сложным по технологическим причинам. На экспериментальных АД получено некоторое уменьшение добавочных потерь при применении оксидирования листов ротора после штамповки, при переходе с заливки ротора под давлением на заливку центробежную или вибрационную и при термообработке залитого ротора. Внедрение каждого их этих способов в серийное производство зависит от экономических условий;

обработка внешней поверхности ротора самовращающимся резцом вместо обычного является рекомендуемым способом уменьшения добавочных потерь.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ТЕПЛОВОЙ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ РАСЧЕТЫ

5.1. ЗАДАЧИ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА

Главной задачей теплового расчета является определение средних и максимальных температур частей электрических машин. Температуры не должны превышать предельно допустимых значений, установленных соответствующими стандартами в зависимости от класса нагревостойкости системы изоляции. Несоблюдение этого условия приводит к уменьшению срока службы машины из-за ускоренного старения изоляционных материалов.

Тепловой расчет позволяет также проектировщику представить картину распределения тепловых потоков, выявить наиболее нагруженные в тепловом отношении части машины для повышения, при необходимости, эффективности их охлаждения или выбора наиболее пригодного решения по конструкции.

Для снижения порядка уравнений в большинстве случаев определяют превышения температуры, т.е. разность температуры отдельных частей машины и базовой температурой (как правило, в качестве базовой принимается температура охлаждающей среды).

Ниже рассматриваются машины только с воздушным охлаждением. Приведенные способы расчета можно, при соответствующих изменениях, использовать и для других способов охлаждения.

5.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА

Теплопроводность. Основной закон теплопроводности (закон Фурье) устанавливает

$$P = -\lambda S \operatorname{grad} \vartheta, \tag{5.1}$$

где P – тепловой поток; S – площадь сечения, перпендикулярного направлению распространения теплового потока; λ – коэффициент теплопроводности материала.

Направление распространения теплового потока противоположно направлению температурного градиента.

Для одномерного температурного поля, если температура изменяется, например, только в направлении оси x, (5.1) можно упростить:

$$P = -\lambda S \frac{d\vartheta}{dx}, \tag{5.2}$$

где $d\vartheta/dx$ – угол, образованный касательной к кривой распределения температуры в рассматриваемой точке и осью x.

Конвективный теплообмен. Теплообмен между потоками газа или жидкости и поверхностью соприкасающегося с ними тела называется

конвективной теплоотдачей. При расчете теплоотдачи используют закон Ньютона

$$P = \alpha A(\vartheta - \vartheta_u), \tag{5.3}$$

где α – коэффициент теплоотдачи; A – площадь поверхности теплообмена; ϑ_u – температура охлаждающего газа (жидкости); ϑ – температура поверхности тела.

Значение коэффициента α, который в (5.3) является коэффициентом пропорциональности, зависит от режима течения охлаждающего газа и ряда других факторов. Различают свободную и вынужденную конвекции. При свободной конвекции движение частиц газа в поле тяжести вызвано разной их плотностью из-за неоднородности температурного поля. При вынужденной конвекции движение частиц газа происходит под действием внешних сил, вызываемых источниками давления (вентиляторами).

Теплообмен излучением. Теплообмен излучением описывается законом Стефана–Больцмана

$$P = \epsilon c_0 (T^4 - T_0^4) A, \tag{5.4}$$

где T – абсолютная температура излучающей поверхности; T_0 – температура окружающей среды; c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; ϵ – коэффициент теплового излучения; A – площадь поверхности тела.

Коэффициент ϵ характеризует излучательную способность тела и зависит от состояния поверхности тела, его цвета, температуры и др. Этот коэффициент изменяется в пределах от 0 до 1.

Нестационарная теплопроводность. Нестационарные процессы связаны с изменением энтальпии тела при его нагревании или охлаждении. Это изменение выражается соотношением

$$P = cm \frac{\Delta\vartheta}{\Delta t}, \tag{5.5}$$

где c – удельная теплоемкость; m – масса; $\Delta\vartheta/\Delta t$ – скорость изменения температуры.

Для охлаждающего газа это соотношение можно представить в виде

$$P = c_v Q \Delta\vartheta, \tag{5.6}$$

где $Q = m/(\Delta t \rho)$ – расход охлаждающего газа; $c_v = C/\rho$ – удельная теплоемкость газа.

Соотношения (5.5), (5.6) определяют связь между тепловым потоком P и изменением температуры (нагревом). Коэффициент пропорциональности зависит от количества вещества (m, Q) и его удельной теплоемкости (c, c_v).

Физические свойства материалов. Для теплового расчета машин необходимо знать физические свойства проводов, электротехнической стали, изоляционных и конструкционных материалов, охлаждающего газа: плотность ρ; коэффициент теплопроводности λ; удельную теплоемкость c; кинематическую вязкость (ν) (для охлаждающего газа). Для основных материалов и воздуха эти данные приведены в табл. 5.1 и 5.2 соответственно.

Таблица 5.1

Наименование	ρ, $\frac{кг}{м^3}$	λ, $\frac{Вт}{м \cdot °C}$	c, $\frac{Дж}{кг \cdot °C}$
Токопроводящие и конструкционные материалы:			
Медь чистая	8900	380	385
Алюминий чистый	2700	200	890
Алюминий литой	2700	190	–
Железо чистое	7870	67,5	465
Сталь (0,6% С)	7880	40	490
Сталь конструкционная	–	48	–
Чугун (3% С)	7700	55	450
Серый чугун	–	47–51	–
Электротехническая сталь при содержании кремния, %:			
0,4–0,8	–	48–41	–
0,6–1,2	7800	44–35	–
1,8–2,3	–	30–26	450–460
3,6–4,2	7600	20–19	–
Изоляционные материалы и лаки			
Электротехнический картон	900–1100	0,174–0,187	1500
Стеклотекстолит	1600–1900	0,19–0,32	–
Стекломиканит	–	0,158	–
Пленка полиэтилентерефталатная ПЭТФ	–	0,11–0,13	–
Пленка полиимидная ПМ-1	–	0,15–0,17	–
Композиционный материал:			
"Изофлекс-2"	–	0,162	–
"Номекс"	–	0,124	–
Лак:			
бакелитовый	400	0,29	–
КП 103	–	0,41	–
кремнийорганический	–	0,186	–

Примечания: 1. Значения λ для электротехнической стали соответствуют теплопроводности вдоль листа.

2. Значения λ вдоль оси сердечника зависят от толщины листа, давления спрессовки, вида изоляции и составляют 0,87–3 Вт/(м·°С).

3. Зависимость λ стали от содержания кремния можно выразить приближенным соотношением $\lambda \approx 47 \div 6{,}5\,\%\,Si$.

Таблица 5.2

Температура, °С	Параметры сухого воздуха при давлении 10^5 Па			
	ρ, $\frac{кг}{м^3}$	λ, $\frac{Вт}{м \cdot °C}$	c_ν, $\frac{Дж}{кг \cdot °C}$	ν, 10^{-5} м²/с
0	1,252	0,0306	1300	1,396
10	1,247	0,0299	1255	1,46
20	1,205	0,0292	1255	1,51
30	1,165	0,0285	1173	1,6
40	1,127	0,0279	1136	1,7
50	1,093	0,0271	1101	1,8
60	1,060	0,0264	1068	1,89
70	1,029	0,0257	1037	1,99
80	1	0,0238	1009	2,09
90	0,972	0,025	983	2,2

Свойства воздуха зависят от давления, температуры и влажности. Соответствующие зависимости, выраженные аналитически или графически, приведены в справочниках.

Значения параметров ρ, λ, c материалов не являются постоянными и, в частности, зависят от температуры. В большинстве случаев при расчетах значения этих параметров приводятся к предполагаемой температуре частей двигателя либо принимается среднее значение для предполагаемого диапазона температур, что обычно допустимо.

Коэффициент теплоотдачи определяется при следующих процессах.

Свободная конвекция. Из теоретического анализа и опыта известно, что среднее значение коэффициента теплоотдачи α зависит от разности температур поверхности тела и охлаждающего газа ϑ и приближенно равно

$$\alpha_{pk} \approx c_{pk} \vartheta^{0,25}. \qquad (5.7)$$

Коэффициент c_{pk} определяется формой, размерами и положением тела в пространстве. Так, для горизонтального бесконечно длинного цилиндра диаметром D

$$c_{pk} = 1{,}315 D^{-0,25} \text{ при } D \leqslant 0{,}25 \text{ м};$$

$$c_{pk} = 1{,}05 \div 1{,}2 \text{ при } D > 0{,}25 \text{ м};$$

для вертикальной бесконечно длиной плоской стены высотой h

$$c_{pk} = 1{,}365 h^{-0,25} \text{ при } h \leqslant 0{,}3 \text{ м};$$

$$c_{pk} = 1{,}78 \quad \text{при } h > 0{,}3 \text{ м};$$

для плоской квадратной поверхности со стороной l:

обращенной вверх

$$c_{pk} = 1{,}315\, l^{0,25} \quad \text{при } l \leqslant 0{,}3 \text{ м};$$

$$c_{pk} = 2{,}5 \quad \text{при } l > 0{,}3 \text{ м};$$

обращенной вниз

$$c_{pk} = 0{,}59 l^{-0,25} \quad \text{при } l \leqslant 0{,}3 \text{ м};$$

$$c_{pk} = 1{,}315 \quad \text{при } l > 0{,}3 \text{ м}.$$

Особые случаи свободной конвекции в замкнутых пространствах и узких щелях (аксиальных каналах ротора) описаны в специальной литературе.

Вынужденная конвекция. Элементы электрических машин имеют различные условия охлаждения. При определении коэффициента α можно воспользоваться следующими соотношениями между числами Нуссельта и Рейнольдса для каналов (трубопроводов):

$$\left.\begin{aligned} &\text{Nu} = 1{,}83\,\text{Re}^{0,5} \quad \text{при Re} \leqslant 1{,}5\cdot 10^5;\\ &\text{Nu} = 0{,}064\,\text{Re}^{0,78} \quad \text{при Re} > 1{,}5\cdot 10^5. \end{aligned}\right\} \tag{5.8}$$

Эти зависимости справедливы для длинных каналов; для коротких каналов должен вводиться поправочный коэффициент $\epsilon_l > 1$. Теплоотдача при ламинарном течении более сложна, она зависит также от формы канала.

Характерным размером для чисел Рейнольдса и Нуссельта является диаметр d для круглого канала или гидравлический диаметр $d_H = 4\dfrac{s}{\Pi}$ для канала произвольной формы (сечения s и периметра П).

Аксиальные каналы ротора:

$$\text{Nu} = 0{,}035\,\text{Re}^{0,8} \quad \text{при } 3{,}5\cdot 10^4 < \text{Re} < 10^5. \tag{5.9}$$

В этом соотношении учтены влияния длины канала $\epsilon_l (l/d \approx 10)$ и его вращение ϵ_ω.

Открытые каналы (внешняя поверхность ребристой станины): для расчета теплоотдачи при входе воздуха в ребра станины:

$$\text{Nu}_{\text{эф}} = 0{,}626\,\text{Re}_{\text{эф}}^{0,522}; \tag{5.10}$$

$$\alpha_{k0} = \frac{\lambda}{d_{Hk}}\,\text{Nu}_{\text{эф}}, \tag{5.11}$$

с характерным размером

$$d_{Hk} = 4\,\frac{b_k h_k}{b_k + 2h_k} \tag{5.12}$$

и скоростью

$$v_{\text{эф}} = \sqrt{(0{,}5u_{2ve})^2 + v_k^2}, \tag{5.13}$$

где u_{2ve} – окружная скорость вентилятора; v_k – аксиальная составляющая скорости течения воздуха между ребрами; b_k – ширина канала между ребрами; h_k – высота ребер.

Значение коэффициента теплоотдачи уменьшается по длине станины из-за рассеяния воздуха и уменьшения его скорости согласно соотношению

$$\alpha_k = \alpha_{k0}\, e^{-p_k \frac{x}{d_{Hk}}}, \tag{5.14}$$

где

$$p_k = 0{,}055\left\{1 - \text{th}\left[0{,}062\left(\frac{D_k}{d_{Hk}} - 12{,}5\right)\right]\right\}; \tag{5.15}$$

D_k – внешний диаметр станины.

Среднее значение коэффициента α_k для станины длиной l_k

$$\alpha_k = \alpha_{k0}\,\frac{d_{Hk}}{p_k l_k}\left(1 - e^{-\frac{p_k}{d_{Hk}} l_k}\right). \tag{5.16}$$

Для расчета коэффициента теплоотдачи различных частей АД можно воспользоваться приводимыми далее формулами.

Среднее значение $\alpha_л$ для поверхности лобовых частей

$$\alpha_{лс} = 31{,}7 v_{2p}^{0,6}, \tag{5.17}$$

где v_{2p} – окружная скорость ротора.

Короткозамыкающие кольца (лопатки) ротора

$$\alpha_{ck} = 16{,}5 v_{2p}^{0,65}. \tag{5.18}$$

Внутренняя поверхность станины

$$\alpha_{ki} = 15 + 5{,}37 v_{2p}^{0,8}. \quad (5.19)$$

Щиты машин со степенью защиты IP44:
внешняя поверхность со стороны вентилятора

$$\alpha'_{sl} = 20 + 5{,}1 v_{2vl}^{0,8}; \quad (5.20)$$

то же со стороны привода

$$\alpha''_{sl} \approx (0{,}6 \div 0{,}8)\,\alpha'_{sl}; \quad (5.21)$$

внутренняя поверхность

$$\alpha_{si} = 15 + 5{,}37 v_{2p}^{0,8}. \quad (5.22)$$

Для расчета теплоотдачи в воздушном зазоре при отсутствии аксиального движения воздуха справедливо общее выражение

$$\mathrm{Nu}_\delta^* = 0{,}23\,(2\delta/D)^{0,25}\,\mathrm{Re}_\delta^{0,5}, \quad (5.23)$$

где $\mathrm{Re}_\delta = v_{2p}\,\delta/\nu$; $\mathrm{Nu}_\delta^* = \alpha_\delta\,\delta/\lambda$; D – внешний диаметр ротора; δ – воздушный зазор.

Характерный размер (гидравлический диаметр) зазора равен $d_H = 2\delta$, а характерная скорость в зазоре

$$v = \frac{1}{2} v_{2p}.$$

Коэффициент α_δ характеризует теплоотдачу с одной стороны зазора, которая предполагается одинаковой для ротора и статора.

Для малых машин, особенно при малых зазорах ($\delta < 1$ мм) и окружных скоростях ротора v_{2p}, соотношение (5.23) сильно занижает значение α_δ. Если в качестве нижнего предела принять значение Nu_δ, определенное по теплопроводности зазора

$$(\mathrm{Nu}_\delta)_{min} = 2,$$

то при расчете следует принимать значение

$$\mathrm{Nu}_\delta = \max(2;\ \mathrm{Nu}_\delta^*)$$

и результирующий коэффициент

$$\alpha_\delta = \xi_\delta \frac{\lambda \mathrm{Nu}_\delta}{\delta}. \quad (5.24)$$

Поправочный коэффициент ξ_δ, определенный по результатам испытаний машин, равен 1,25 при $2p = 2$ и 4; 1,15 при $2p = 6$ и 8.

И з л у ч е н и е. Коэффициент α_s, характеризующий интенсивность теплового излучения, приближенно равен

$$\alpha_s \approx 4{,}2 + 0{,}05\,\vartheta_0 + 0{,}031\,\vartheta, \quad (5.25)$$

где ϑ_0 – температура окружающей среды; ϑ – температура поверхности тела.

При обычных условиях охлаждения электрических машин доля теплового излучения относительно мала, кроме того, соотношения для конвективного теплообмена (свободного и вынужденного) учитывают и теплообмен излучением, долю которого нельзя выделить.

Приведенные выше зависимости включают в себя только основные факторы, оказывающие влияние на теплообмен, и справедливы для определенных условий (размеры машин, частота вращения, конструктивные решения). Поэтому рекомендуется – при использовании приведенных соотношений для новых серий подобных машин – ввести дополнительный поправочный коэффициент ξ_α, который уточняется по результатам испытаний опытных образцов (вначале принимается $\xi_\alpha = 1$). Тогда действительный коэффициент теплоотдачи равен

$$\alpha = \xi_\alpha \alpha',$$

где α' – расчетное значение коэффициента.

5.3. УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Дифференциальное уравнение теплопроводности в твердых телах

$$\mathrm{div}(\lambda\,\mathrm{grad}\,\vartheta) + p = c\rho\,\frac{d\vartheta}{dt}, \quad (5.26)$$

где p – производительность (удельная мощность) внутреннего источника теплоты в теле; ϑ – превышение температуры.

Для установившегося теплового состояния тела $d\vartheta/dt = 0$, поэтому правая часть уравнения (5.26) равна 0. Для изотропного тела ($\lambda = \mathrm{const}$) и при $p = \mathrm{const}$ получаем известное уравнение Пуассона

$$\nabla^2 \vartheta = p/\lambda, \quad (5.27)$$

которое при $p = 0$ (т.е. при отсутствии внутренних источников теплоты) переходит в уравнение Лапласа

$$\nabla^2 \vartheta = 0. \quad (5.28)$$

Для решения приведенных уравнений в общем случае необходимо знание граничных условий, которые могут быть заданы несколькими способами:

граничные условия первого рода

$$\vartheta_r = \vartheta(\bar{r}, t); \quad (5.29)$$

граничные условия второго рода

$$z_r = -\lambda(d\vartheta/dn)_r = \varphi(\bar{r}, t); \quad (5.30)$$

граничные условия третьего рода

$$\left(\frac{d\vartheta}{dt}\right)_r = -\frac{\alpha}{\lambda}[\vartheta_r(t) - \vartheta_u(t)]; \quad (5.31)$$

граничные условия четвертого рода

$$\lambda_i (d\vartheta_i/dn)_r = \lambda_{i-1}(d\vartheta_{i-1}/dn)_r. \quad (5.32)$$

В этих соотношениях $\bar{r}$ – текущая координата; r – индекс, указывающий на поверхность тела; n – нормаль к поверхности тела; ϑ_u – температура окружающей среды.

Аналитическое решение приведенных общих уравнений весьма затруднительно, а в большинстве случаев невозможно. Решение частично упрощается для установившегося теплового состояния при постоянных параметрах (λ, c, α). В зависимости от характера задачи выбирают наиболее удобные координаты – декартовы, цилиндрические или полярные.

Наиболее распространенными методами решения дифференциальных уравнений в частных производных являются метод конечных разностей и метод конечных элементов, позволяющие с помощью ЭВМ решить сложные тепловые задачи в установившемся и неустановившемся режимах.

Результатом такого решения является температурное поле, представленное в виде набора параметров для точек рассматриваемой области либо в виде семейства изотерм.

5.4. МЕТОДЫ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА

Так как электрическая машина в тепловом отношении представляет собой сложную систему, то в целях упрощения расчета ее разбивают на элементы. При этом связь между отдельными элементами машины и окружающей средой выражают соответствующими граничными условиями.

Разбиение машины на элементы проводят по функциональному признаку: электрические элементы (обмотка, короткозамкнутая клет-

ка), магнитные элементы (сердечники) и элементы конструкции (станина, щиты, и т.д). Некоторые элементы часто подразделяют на участки, различающиеся условиями охлаждения (лобовые и пазовые части обмоток, короткозамыкающие кольца и стержни клеток ротора, зубцы и спинка сердечника и т.д.). Эти отдельные элементы, особенно активные (обмотки, сердечники), можно считать стержнями с тепловым потоком, проходящим преимущественно в одном направлении, с теплообменом по периметру сечения и на концах, с внутренними источниками теплоты или без них. Таким образом, всю машину можно представить в виде системы стержней с различными условиями охлаждения и тепловыми связями.

Ограничимся вначале установившимся тепловым состоянием и рассмотрим методы теплового расчета.

Метод температурных полей. Метод основан на решении дифференциального уравнения теплопроводности рассматриваемой части машины с учетом соответствующих граничных условий. Для типичных задач решение уже выведено (причем в большинстве случаев достаточно рассмотрения одномерной задачи). Результатом решения по этому методу является температурное поле (кривая распределения температуры при одномерной задаче), что позволяет определить такие важные величины, как среднее превышение температуры, тепловые потоки на концах и с поверхностей и, главным образом, экстремальное значение температуры.

Точность такого метода зависит в значительной степени от точности задания граничных условий.

Метод эквивалентных тепловых схем. Электрическую машину заменяют системой тел, соответствующих отдельным частям машины и соединенных между собой и с местами отвода теплоты. Такая система, называемая тепловой схемой замещения, представляет собой в сущности модель путей тепловых потоков и состоит из источников потерь (теплоты), узлов, ветвей (представляемых тепловыми сопротивлениями) и заземлений (мест передачи теплоты охлаждающему агенту или окружающей среде).

Термическое сопротивление

$$R_{ij} = (\vartheta_i - \vartheta_j)/P_{ij} = \Delta\vartheta_{ij}/P_{ij}, \quad (5.33)$$

определяется отношением разности средних температур на концах ветви к тепловому потоку, проходящему через эту ветвь. Исходя из (5.33) определяем термические сопротивления для рассмотренных выше способов теплообмена:

сопротивление, обусловленное теплопроводностью: из соотношения (5.2) при замене $d\vartheta/dx$ выражением $\Delta\vartheta/l$ получим

$$R_\lambda = l/(\lambda S), \quad (5.34)$$

где l – длина; S – сечение тела;

сопротивление, обусловленное теплоотдачей: из (5.3) следует, что термическое сопротивление потока хладагента равно

$$R_a = 1/(aA). \quad (5.35)$$

При условии изменения температуры хладагента по линейному закону средняя температура $\Delta\vartheta_{as} = \Delta\vartheta/2$ и

$$R_a = 1/(2c_v Q). \quad (5.36)$$

Из выведенных соотношений видно, что термические сопротивления зависят как от тепловых параметров (коэффициенты λ, a, c_v), так и от размеров пути теплового потока (l, S, A) или расхода хладагента Q. Если значения λ, a, c_v постоянны, то постоянны и термические сопротивления. В этом случае метод сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений. Результатом расчета являются средние температуры отдельных частей и участков машин, которые позволяют определить тепловые потоки.

Большое преимущество метода эквивалентных тепловых схем заключается в достаточно достоверном описании тепловых явлений во всем объеме машины. Метод позволяет приближенно решать и многомерные задачи, используя принцип суперпозиции для тепловых потоков каждого направления. Результаты расчета часто служат граничными условиями для более подробного расчета тепловых полей отдельных частей машины.

Метод эквивалентных греющих потерь. Метод основан на принципе наложения, согласно которому среднее превышение температуры отдельных частей машины в установившемся тепловом режиме можно представить в виде суммы, превышений температуры, вызванных собственными потерями и потерями в остальных частях машины. Так, среднее превышение температуры обмотки статора АД определяется выражением

$$\vartheta_s = \frac{1}{R_s}(P_s + k_{\mathrm{Fe}}P_{\mathrm{Fe}} + k_z P_z), \quad (5.37)$$

где R_s – эквивалентное термическое сопротивление обмотки; P_s, P_{Fe}, P_z – соответственно потери в обмотке и сердечнике статора, в роторе; k_{Fe}, k_z – коэффициенты, учитывающие влияние соответствующих потерь на температуру обмотки.

Тепловые параметры R, k определяют либо экспериментально для данной машины, либо из соответствующих соотношений, выведенных по результатам испытаний подобных машин, либо из расчета эквивалентных тепловых схем. Эти параметры постоянны при сохранении условий охлаждения двигателей.

Использование этого метода ограничено и не позволяет определить влияние конструкционных изменений на охлаждение, поэтому этот метод не получил такого широкого распространения, как предыдущие методы.

5.5. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

Способ решения уравнения теплопроводности покажем на примере одномерной задачи для установившегося термического состояния. Это решение в дальнейшем используем для уточнения термических сопротивлений.

Охлаждаемый стержень. Рассмотрим стержень (рис. 5.1) длиной l с постоянным сечением S произвольной формы и периметрами Π_1, Π_2. Стержень охлаждается с двух противоположных сторон поверхностей; коэффициенты теплоотдачи α_1, α_2, превышения температуры окружающей среды с двух сторон ϑ_{u1}, ϑ_{u2}. В стержне с коэффициентом теплопроводности λ имеются равномерно распределенные внутренние источники теплоты с производительностью, линейно зависящей от превышения температуры ϑ:

$$p = p_0(1 + \epsilon\vartheta).$$

Основное уравнение одномерного теплового потка в продольном направлении x (в поперечных сечениях считаем температурное поле постоянным) имеет вид

$$-\lambda S\frac{d^2\vartheta}{dx^2} + \alpha_1\Pi_1(\vartheta - \vartheta_{u1}) + \alpha_2\Pi_2(\vartheta - \vartheta_{u2}) = p_0(1 + \epsilon\vartheta)S. \quad (5.38)$$

Для упрощения введем вспомогательные выражения

$$\rho^2 = (\alpha_1\Pi_1 + \alpha_2\Pi_2 - \epsilon p_0 S)\frac{l^2}{\lambda S};$$

$$\Theta = (\alpha_1\Pi_1\vartheta_{u1} + \alpha_2\Pi_2\vartheta_{u2} + p_0 S)\frac{l^2}{\lambda S}, \quad (5.39)$$

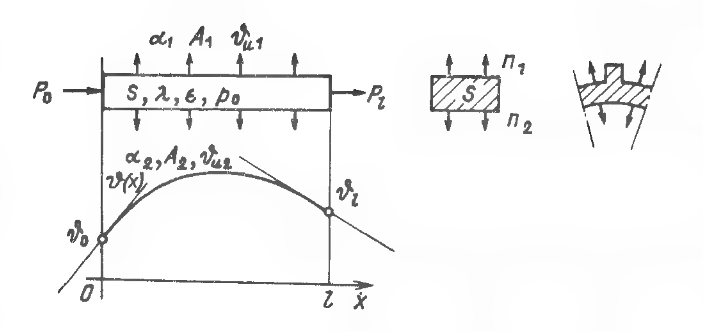


Рис. 5.1. Распределение температуры по длине стержня

тогда

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} - \frac{\rho^2}{l^2}\vartheta = -\frac{\Theta}{l^2}. \tag{5.40}$$

В зависимости от значения ρ^2 различают следующие три случая:

1) $\rho^2 > 0$ (наиболее часто встречающийся случай). Тогда

$$\vartheta(x) = M\,\mathrm{ch}\left(\rho\frac{x}{l}\right) + N\,\mathrm{sh}\left(\rho\frac{x}{l}\right) + \frac{\Theta}{\rho^2}, \tag{5.41}$$

где M, N — постоянные интегрирования, зависящие от граничных условий.

Среднее превышение температуры стержня

$$\vartheta_s = \frac{1}{l}\int_0^l \vartheta(x)\,dx = M\frac{1}{\rho}\,\mathrm{sh}\rho + N\frac{1}{\rho}(\mathrm{ch}\rho - 1) + \frac{\Theta}{\rho^2}. \tag{5.42}$$

Если в качестве граничных условий задать тепловые потоки P_l на обоих концах стержня, т.е.

$$x = 0;\ P_0 = -\lambda S\left(\frac{d\vartheta}{dx}\right)_0;\ x = l;\ P_l = -\lambda S\left(\frac{d\vartheta}{dx}\right)_l, \tag{5.43}$$

то постоянные интегрирования

$$M = \frac{l}{\lambda S}\,\frac{P_0\,\mathrm{ch}\rho - P_l}{\mathrm{sh}\rho};\quad N = -\frac{l}{\lambda S}\,\frac{1}{\rho}P_0; \tag{5.44}$$

2) $\rho^2 = 0$ при $\alpha_1\Pi_1 + \alpha_2\Pi_2 = \epsilon p_0 S$. Общее решение в таком случае имеет вид

$$\vartheta(x) = M + N\frac{x}{l} - \frac{1}{2}\Theta\left(\frac{x}{l}\right)^2; \tag{5.45}$$

среднее превышение температуры

$$\vartheta_s = M + \frac{1}{2}N - \frac{1}{6}\Theta, \tag{5.46}$$

а постоянные интегрирования (при заданных потоках P_0, P_l)

$$M = \vartheta_0;\quad N = -\frac{l}{\lambda S}P_0; \tag{5.47}$$

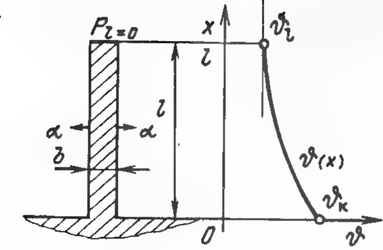


Рис. 5.2. Распределение температуры по высоте ребра станины

3) $\rho^2 < 0$, что встречается весьма редко, например при $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$; $\epsilon \neq 0$. Тогда

$$\vartheta(x) = M\cos\left(|\rho|\frac{x}{l}\right) + N\sin\left(|\rho|\frac{x}{l}\right) - \frac{\Theta}{|\rho^2|}, \tag{5.48}$$

где $|\rho| = \sqrt{|\rho^2|}$. Решение здесь имеет физический смысл только для $\rho\frac{x}{l} < \frac{\pi}{2}$.

Ребро прямоугольного профиля. Такими обыкновенно представляют наружные ребра станин электрических машин со степенью защиты IP44. Ребро можно рассматривать как частный случай стержня с основанием ($x = 0$) у станины (рис. 5.2). Высота ребра l, сечение $S = bl$. Полагаем $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$; $\vartheta_{u1} = \vartheta_{u2} = \vartheta_u$; $p_0 = 0$; $\Pi_1 = \Pi_2 = l$.

Из уравнений (5.39) получаем

$$\rho^2 = \frac{2\alpha}{\lambda b}l^2 > 0;\ \rho = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda b}}\,l > 0. \tag{5.49}$$

Граничные условия: превышение температуры стержня у основания ($x = 0$) равно среднему превышению температуры станины $\vartheta(0) = \vartheta_k$; конец ребра не охлаждается ($P_l = 0$), $(d\vartheta/dx)_l = 0$; $\vartheta_u = 0$.

Распределение превышения температуры по высоте ребра выражается функцией

$$\vartheta(x) = \vartheta_k\,\frac{\mathrm{ch}\rho(1 - x/l)}{\mathrm{ch}\rho}. \tag{5.50}$$

Среднее превышение температуры ребра

$$\vartheta_s = \vartheta_k\eta_z, \tag{5.51}$$

где

$$\eta_z = \frac{1}{\rho}\,\mathrm{ch}\rho;\ 0 < \eta_z < 1, \tag{5.52}$$

представляет собой так называемый коэффициент качества ребра (степень использования поверхности ребра для охлаждения).

Ребро произвольного профиля. Распределение температуры по высоте ребра при различных условиях охлаждения и произвольном профиле ребра приведено в литературе.

5.6. РАСЧЕТ ТЕРМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Основные виды термических сопротивлений, соответствующих отдельным видам теплопередачи, выражены соотношениями (5.34) – (5.36). В действительности отвод теплоты от различных частей машин часто осуществляется несколькими видами теплообмена; кроме того, ряд частей машины обладает собственными источниками теплоты. Термические сопротивления определяются более сложными выражениями, которые принципиально можно свести к следующему виду:

$$R = R_z \frac{1}{\xi}, \qquad (5.53)$$

где ξ – корректирующий коэффициент.

Внутренние термические сопротивления. Рассмотрим стержень с равномерным внутренним выделением теплоты по всему объему (p_0 = const, $\xi = 0$) без охлаждения наружной поверхности ($\alpha_1 = \alpha_2 = 0$) (рис. 5.3). Суммарные потери в стержне

$$P_t = p_0 Sl > 0.$$

Тепловой поток, входящий в стержень извне, – P_0, выходящий из стержня – $P_l = P_t + P_0$. При этих условиях распределение температуры описывается уравнением (5.45) с постоянными интегрирования M, N по (5.47), среднее превышение температуры – по (5.46).

Внутреннее сопротивление выходной части стержня

$$R_v\Big|_l = (\vartheta_s - \vartheta_l)/P_l,$$

где в качестве определяющего теплового потока принимается P_l или

$$R_v\Big|_l = R_v \frac{1}{\xi}\Big|_l, \qquad (5.54)$$

где

$$\frac{1}{\xi}\Big|_l = \frac{1}{3}\,\frac{1 + 1{,}5\zeta}{1 + \zeta}; \quad \zeta = \frac{P_0}{P_t}. \qquad (5.55)$$

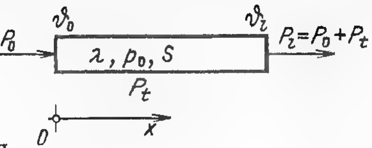


Рис. 5.3. К расчету сопротивления стержня с внутренним источником теплоты без охлаждения наружной поверхности

Аналогично для входной части стержня

$$R_v\Big|_0 = \frac{\vartheta_0 - \vartheta_s}{P_0} = R_v \frac{1}{\xi}\Big|_0, \qquad (5.56)$$

где

$$\frac{1}{\xi}\Big|_0 = \frac{1}{6}\,\frac{1 + 3\zeta}{\zeta}. \qquad (5.57)$$

Следовательно, коэффициенты $1/\xi$ не являются постоянными, а зависят от соотношения тепловых потоков (5.55). Если предположить $R_v > 0$ и $\zeta > 0$, то получим следующие ограничения:

$$1/3 \leqslant (1/\xi)_l \leqslant 1/2; \quad 1/2 \leqslant (1/\xi)_0. \qquad (5.58)$$

Так как заранее не известно распределение потоков, то не известно и $1/\xi$; определен только диапазон изменения значений $1/\xi$. При расчете обычно принимают максимальное значение $1/\xi$. Другие случаи внутренних термических сопротивлений других частей электрических машин и соответствующие им значения коэффициентов $1/\xi$ приведены в литературе.

Термическое сопротивление контакта. Этот вид сопротивления соответствует теплопередаче в контактном слое между сердечником и станиной, валом и сердечником, стержнями клетки ротора и сердечником, щитами и станиной и т.д. Значение этого сопротивления определяется шероховатостью контактируемых поверхностей, видом посадки и т.д. Учитывая сложность определения этого сопротивления, введем некоторый эквивалентный равномерный воздушный зазор δ, тогда

$$r_\epsilon = \delta/(\lambda_v A_\epsilon), \qquad (5.59)$$

где A_ϵ – поверхность соприкосновения.

Значение δ в большинстве случаев определяют из эмпирических зависимостей, полученных при исследовании машин или моделей, выполненных по соответствующей технологии. Для АД со степенью защиты IP44 и ребристой станиной эквивалентный зазор между сердечником и станиной, м,

$$\delta_{vk} = (0{,}42 + 3{,}16 D_{a1}) \cdot 10^{-5}, \qquad (5.60)$$

где D_{a1} – внешний диаметр сердечника статора, м.

В ряде случаев термическое сопротивление контакта удобно выразить в виде

$$r_\epsilon = 1/(k_\epsilon A_\epsilon); \quad k_\epsilon = \lambda_\nu/\epsilon_\nu, \tag{5.61}$$

Для сердечника статора, залитого алюминиевым сплавом (такая технология изготовления станин применяется в малых машинах), ϵ_{pk} = = 0,038 мм, чему соответствует $k_{pk} \approx 710$ Вт/(°С·м²).

Значение коэффициента k: для литых клеток $k_{dr} = 1670$ Вт/(°С·м²), для сварных $k_{dr} = 330$ Вт/(°С·м²).

Термические сопротивления катушек обмотки статора. Катушки представляют собой сложное тело, свойства которого в продольном и поперечном направлениях значительно различаются. При расчете катушка заменяется телом с эквивалентным поперечным коэффициентом теплопроводности $\lambda_п$. Внутреннее термическое сопротивление катушки в поперечном сечении (направлении) рассчитывают так же, как для стержня с внутренним источником теплоты.

Для ориентировочного расчета при определении суммарного термического сопротивления между обмоткой и сердечником статора достаточно воспользоваться эквивалентным коэффициентом теплопередачи k_α, учитывающим внутреннее сопротивление катушки, пазовую изоляцию, эквивалентный воздушный зазор между пазовой изоляцией и сердечником, тогда

$$r_{\alpha s} = 1/(k_\alpha A_\alpha). \tag{5.62}$$

Для АД общего назначения значения коэффициента k_α приведены ниже:

Высота оси вращения, мм	56–100	112–132	160
Коэффициент теплопередачи, Вт/(°С·м²)	110–140	90–110	80–100

Результирующие термические сопротивления. При расчете тепловых схем замещения электрических машин целесообразно отдельные термические сопротивления заменять результирующим сопротивлением, руководствуясь следующим правилом:

результирующее термическое сопротивление последовательно соединенных постоянных сопротивлений равно

$$r_n = \sum_i r_i, \tag{5.63}$$

а параллельно соединенных сопротивлений

$$r_n = \left(\sum_i \frac{1}{r_i}\right)^{-1} \tag{5.64}$$

при результирующей проводимости

$$g_n = \sum_i g_i.$$

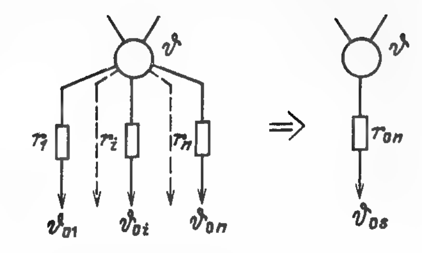


Рис. 5.4. Преобразование схемы замещения с параллельным соединением сопротивлений

Рассмотрим случай параллельного соединения сопротивлений, имеющих одну общую точку (рис. 5.4). Такое соединение сопротивлений можно заменить одной результирующей ветвью с сопротивлением r_n [см. (5.64)] (проводимостью g_n), подключенной к точке со средней температурой, равной

$$\vartheta_{0s} = r_{0n} \sum_{i=1}^{n} \frac{\vartheta_{0i}}{r_i} = \frac{1}{g_n} \sum_{i=1}^{n} g_i \vartheta_{0i}. \tag{5.65}$$

5.7. ПЕРЕСЧЕТ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В ОБМОТКАХ

Зависимость потерь в обмотках от их температуры можно выразить как

$$P_j = P_{j0}[1 + \epsilon_0(\vartheta - \vartheta_0)], \tag{5.66}$$

где ϵ_0 – температурный коэффициент сопротивления обмотки; P_{j0} – потери в обмотке при температуре окружающей среды ϑ_0.

Коэффициент ϵ_0 равен

$$\epsilon_0 = 1/(k + \vartheta_0). \tag{5.67}$$

Если тепловой расчет выполняется для окружающей температуры ϑ_z, отличной от ϑ_0, то потери пересчитывают по формуле

$$P_j = P_{jz}[1 + \epsilon_z(\vartheta - \vartheta_z)], \tag{5.68}$$

где

$$\left.\begin{aligned} P_{jz} &= P_{j0}[1 + \epsilon_0(\vartheta_z - \vartheta_0)]; \\ \epsilon_z &= 1/(k + \vartheta_z) = \epsilon_0/[1 + \epsilon_0(\vartheta_z - \vartheta_0)]. \end{aligned}\right\} \tag{5.69}$$

Потери в обмотке статора при тепловом расчете подразделяются на потери в пазовой части

$$P_{c1n} = P_{c1} l_1/(l_1 + l_{s1}) \tag{5.70}$$

и потери в лобовых частях

$$P_{c1s} = P_{c1} - P_{c1n} = P_{c1}\left(1 - \frac{1}{1 + l_{s1}/l_1}\right), \tag{5.71}$$

где l_{s1} – длина лобовой части обмотки; l_1 – длина сердечника.

Для короткозамкнутой обмотки ротора потери в стержнях и кольцах пропорциональны их сопротивлениям.

5.8. ТЕПЛОВЫЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Основой теплового расчета является эквивалентная схема замещения, при составлении которой учитываются назначение расчета и требования, предъявляемые к нему.

В качестве примера рассмотрим упрощенную схему замещения короткозамкнутого АД со степенью защиты IP44 и наружным обдувом ребристой станины. Введем следующие упрощения:

охлаждение машины симметрично и равномерно в поперечном сечении;

внутренний воздух в машине рассматривается как один элемент со средним превышением температуры ϑ_{vi};

короткозамкнутый ротор представляет собой один элемент;

охлаждением торцевых поверхностей сердечников статора, ротора можно пренебречь;

теплообменом между внутренним воздухом и станиной, станиной и щитами, лапами и окружающей средой можно пренебречь.

Тепловая схема машины представлена на рис. 5.5, где тела с внутренними источниками теплоты обведены окружностью. Теплота из машины отводится наружу двумя путями – через станину к охлаждающему воздуху с превышением температуры на входе ϑ_v и через щиты в окружающую среду.

Нагрев охлаждающего воздуха на входе в ребра станины вызван потерями в вентиляторе P_{ve} и равен

$$\vartheta_v = P_{ve}/(cQ) = 2r_{Qe}P_{vc}. \tag{5.72}$$

Приведенная тепловая схема относится ко всей машине, поэтому r_{12} – результирующее термическое сопротивление двух параллельных ветвей между пазовыми и лобовыми частями, а r_{16} – результирующее сопротивление обеих лобовых частей.

Теплота отводится от станины через термические сопротивления r_k (теплопроводность станины и теплоотдача с ее поверхности) и r_{Qe} (подогрев охлаждающего воздуха), т.е.

$$r_{7v} = r_k + r_{Qe}.$$

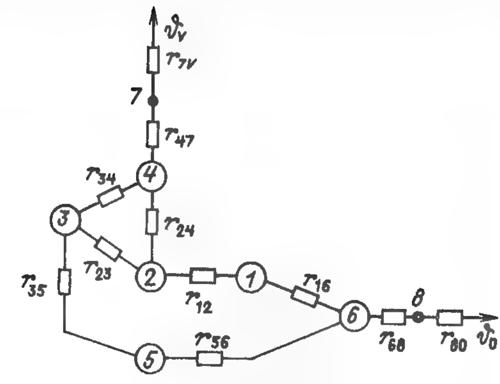


Рис. 5.5. Упрощенная тепловая схема АД со степенью защиты IP44:

1 – лобовые части обмотки статора; *2* – пазовая часть обмотки статора; *3* – зубцы сердечника статора; *4* – спинка сердечника статора; *5* – ротор; *6* – внутренний воздух; *7* – станина; *8* – щиты

Узлы *7* и *8*, если не требуется расчета их температуры, можно легко из схемы исключить, введя результирующие сопротивления

$$r_{4v} = r_{47} + r_{7v} = r_{47} + r_k + r_{Qe}; \quad r_{60} = r_{68} + r_{80}.$$

Для решения схемы замещения воспользуемся первым законом Кирхгофа (метод узлов):

$$\sum_i P_{ij} = P_j,\ j = 1, 2, \dots, 6, \tag{5.73}$$

где тепловые потоки в отдельных ветвях сети

$$P_{ij} = \frac{\vartheta_i - \vartheta_j}{r_{ij}} = g_{ij}(\vartheta_i - \vartheta_j). \tag{5.74}$$

После подстановки r_{ij} и P_i получаем систему линейных алгебраических уравнений, причем число уравнений равно числу точек сети (источников и узлов). Эту систему удобно представить в виде матричного уравнения

$$\mathbf{G}\boldsymbol{\vartheta} = \mathbf{P}, \tag{5.75}$$

где $\mathbf{G} = \|g_{ij}\|$ – квадратная матрица коэффициентов системы; $\boldsymbol{\vartheta} = \|\vartheta_i\|$ – матрица-столбец неизвестных; $\mathbf{P} = \|P_i\|$ – матрица-столбец свободных членов.

Для тепловой схемы на рис. 5.5

$$\mathbf{G} = \left\| \begin{matrix} g_{11} & -g_{12} & 0 & 0 & 0 & -g_{16} \\ -g_{12} & g_{22} & -g_{23} & -g_{24} & 0 & 0 \\ 0 & -g_{23} & g_{33} & -g_{34} & -g_{35} & 0 \\ 0 & -g_{24} & -g_{34} & g_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -g_{35} & 0 & g_{55} & -g_{56} \\ -g_{16} & 0 & 0 & 0 & -g_{56} & g_{66} \end{matrix} \right\|, \tag{5.76}$$

где

$$g_{11} = g_{12} + g_{16} - \epsilon_1 P_{10};$$

$$g_{22} = g_{21} + g_{23} + g_{24} - \epsilon_2 P_{20};$$

$$g_{33} = g_{23} + g_{34} + g_{35};$$

$$g_{44} = g_{24} + g_{34} + g_{4\nu};$$

$$g_{55} = g_{35} + g_{56} - \epsilon_5 P_{50};$$

$$g_{66} = g_{16} + g_{56} + g_{60};$$

$$\vartheta = \begin{Vmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vartheta_3 \\ \vartheta_4 \\ \vartheta_5 \\ \vartheta_6 \end{Vmatrix}; \quad \mathbf{P} = \begin{Vmatrix} P_{10} \\ P_{20} \\ P_3 \\ P_4 + g_{4\nu}\vartheta_\nu \\ P_{50} \\ P_6 + g_{60}\vartheta_0 \end{Vmatrix}. \qquad (5.77)$$

Из (5.76) видно, что матрица **G** симметрическая ($g_{ij} = g_{ji}$) и ее элементы, кроме расположенных по главной диагонали, отрицательные или нулевые.

Тепловая схема АД, предназначенная для более подробного теплового расчета, приведена на рис. 5.6. Эта схема предусматривает расчет машин закрытого и защищенного исполнений с короткозамкнутым и фазным ротором.

В схеме учтены следующие возможные конструктивные решения АД со степенью защиты IP44:

без внутренней циркуляции воздуха, только с местной циркуляцией в области лобовых частей;

с внутренней циркуляцией воздуха (исполнения станины с каналами, полыми ребрами, трубками, самостоятельным охладителем и т.д.);

с форсированным охлаждением ротора (ротор продуваемый, вал с тепловой трубой);

для АД со степенью защиты IP23:

с односторонней вентиляцией;

с двухсторонней (симметричной) вентиляцией.

Такую тепловую схему, включающую в себя машины различных исполнений и конструкций, назовем общей тепловой схемой. Эта схема удобна для программирования.

Если при использовании общей схемы для решения определенной задачи некоторые ветви не имеют смысла, то их проводимости приравниваются нулю. Если к какой-либо точке схемы подводятся только ветви с нулевыми проводимостями, то следует либо эту точку исклю-

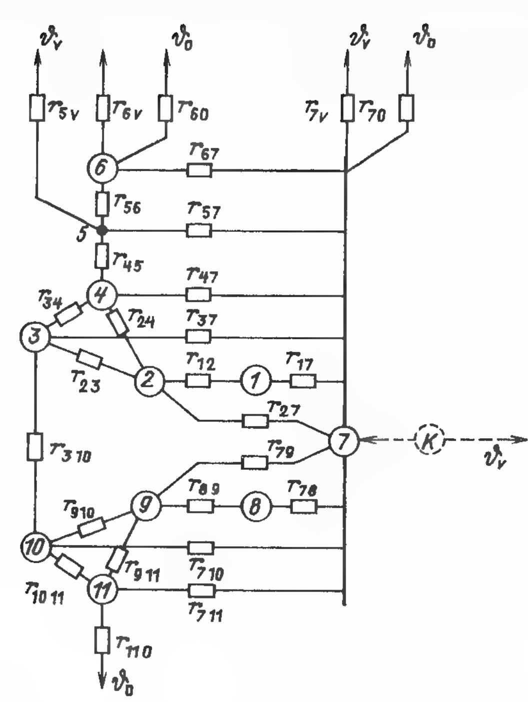


Рис. 5.6. Общая тепловая схема АД:

1–4 – то же, что и на рис. 5.5; *5* – место разветвления тепловых потоков; *6* – станина; *7* – внутренний воздух; *8* – лобовые части обмотки фазного ротора либо короткозамыкающие кольца беличьей клетки; *9* – пазовая часть обмотки фазного ротора либо стержни беличьей клетки; *10* – зубцы сердечника ротора; *11* – спинка сердечника ротора; *К* – контактные кольца

чить из системы, либо приравнять соответствующий элемент матрицы, находящийся на главной диагонали, единице.

Схема, представленная на рис. 5.6, составлена с учетом следующих упрощений:

охлаждение симметрично;

внутренний воздух рассматривается как один элемент со средним превышением температуры ϑ_ν;

теплообмен между станиной и щитами отсутствует.

Для машин закрытого исполнения (IP44) термические сопротивления соответствуют: $r_{7\nu}$ – отводу теплоты от щита со стороны вентилятора; r_{70} – то же со стороны рабочего конца вала; r_{60} – то же от станины; r_{110} – то же к аксиальным каналам (при форсированном охлаждении ротора), или к тепловой трубе в валу, или к валу.

Значения приведенных ниже проводимостей зависят от конструктивного решения машин закрытого исполнения.

1. Машины без внутренней циркуляции воздуха, с ребристой станиной: проводимости $g_{5\nu} = g_{60} = g_{57} = 0$.

2. Машины с внутренней циркуляцией воздуха и осевыми каналами в станине и роторе: проводимости $g_{5\nu} = g_{60} = 0$; термические сопротивления соответствуют: r_{57} – отводу теплоты из сердечника статора к внутреннему воздуху, проходящему в каналах станины; r_{67} – передаче теплоты внутренним воздухом станине.

3. Машины с внутренней циркуляцией воздуха и охладителем: проводимости $g_{5v} = g_{6v} = 0$; термические сопротивления соответствуют: r_{7v} – отводу теплоты от охладителя и щита со стороны вентилятора (в r_{7v} включено также сопротивление r_{Qe}) наружному охлаждающему воздуху; r_{60} – отводу теплоты от станины и щита со стороны привода в окружающую среду.

Для машин защищенного исполнения (IP23) термические сопротивления щитов, очевидно, не имеют значения и внутренний воздух в машине заменяется охлаждающим воздухом, который, проходя через машину, нагревается. При расчете это учитывается сопротивлением r_Q потока охлаждающего воздуха Q.

При вытяжной системе вентиляции (температура воздуха на входе в машину ϑ_0) $g_{70} = g_Q$, $g_{7v} = 0$; при нагнетательной системе вентиляции (температура воздуха на входе в машину за вентилятором ϑ_v) $g_{5v} = g_{6v} = g_{70} = 0$; $g_{7v} = g_Q$.

Ветвь с сопротивлением r_{60} соответствует отводу теплоты наружной поверхностью станины в окружающую среду.

Тепловую схему можно упростить не только заменой нескольких сопротивлений результирующим, но и преобразованием, при котором исключается ряд точек (узлов, источников), что позволяет снизить порядок системы уравнений.

При исключении точки n с потерями $P_n = P_{n0}(1 + \epsilon_n \vartheta_0)$, связанной с точками i ($i = a, b, c, \dots, k$) ветвями, имеющими теплопроводности g_{in} (рис. 5.7), вводятся:

новые ветви с проводимостями

$$g^*_{ij} = g_{in} g_{jn} / g_{nn}; \quad (g^*_{ij} = g^*_{ji}); \qquad (5.78)$$

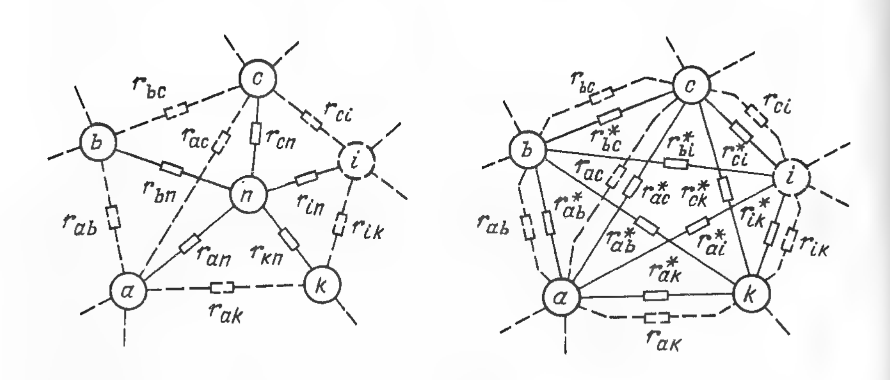


Рис. 5.7. Преобразование тепловой схемы замещения АД

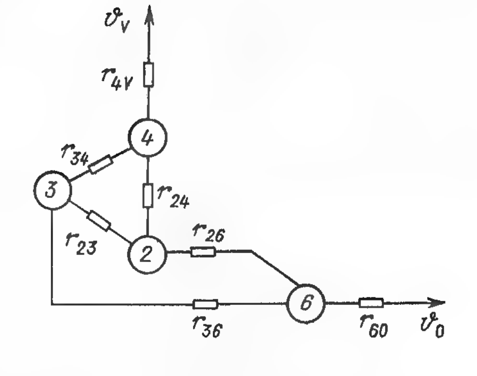


Рис. 5.8. Преобразованная схема замещения АД по рис. 5.5

новые потери

$$P^*_{i0} = P_{n0} \frac{g_{in}}{g_{nn}}, \qquad (5.79)$$

где

$$g_{nn} = \sum_i g_{ij} - \epsilon_n P_{n0}. \qquad (5.80)$$

Новые проводимости g^*_{ij} и проводимости g_{ij} могут заменяться результирующими проводимостями, а новые потери P^*_{i0} могут прибавляться к первоначальным.

Если число первоначальных ветвей (проводимостей g_{in}) в точке n было k, то число ветвей после преобразования составляет $n^* = \frac{1}{2} k(k-1)$. Преобразование сводится в сущности к замене n-плечевой звезды n-угольником.

Исключение точки n оказывает влияние только на термические сопротивления (проводимости) и потери в ветвях, соединенных непосредственно с точкой n; величины остальной части схемы не меняются, соответственно не меняются и тепловые соотношения (температура, потери, тепловые потоки).

Если требуется знать температуру исключенной точки n, то можно воспользоваться основным уравнением для этой точки

$$\vartheta_n = \frac{1}{g_{nn}} \left(P_{n0} + \sum_{i=1}^{k} g_{in} \vartheta_i\right). \qquad (5.81)$$

Приведенный способ исключения прост и удобен для числа ветвей $k = 3$, особенно для $k = 2$. Так, тепловую схему на рис. 5.5 исключением точек *1* и *5* можно привести к схеме, представленной на рис. 5.8.

5.9. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

Как уже отмечалось, основным результатом теплового расчета электрической машины являются средние превышения температур (или температуры) ϑ_s отдельных точек эквивалентной схемы замещения (источников, узлов), которые определяются решением соответствующей системы уравнений (5.75). Систему (5.75) можно решить различными

7–6983

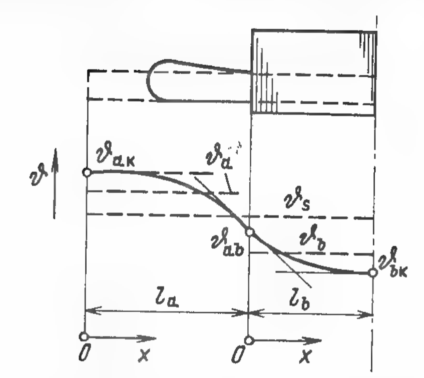


Рис. 5.9. Распределение температуры по длине обмотки статора

способами, например при помощи инверсии матриц

$$\vartheta = \mathbf{G}^{-1}\mathbf{P}, \tag{5.82}$$

по правилу Крамера, применением метода исключения и т.д.

Наиболее важным в тепловом расчете является определение средних и максимальных значений температуры обмоток. Так как в тепловой схеме замещения обмотка подразделяется на элементы, то ее средняя температура в общем виде находится из выражения

$$\vartheta_s = \frac{1}{L}\sum \vartheta_i l_i, \quad L = \sum_i l_i, \quad i = 1, 2, \ldots, n, \tag{5.83}$$

где l_i — длина отдельных элементов обмотки.

Зная средние температуры ϑ_i отдельных частей обмотки, определяем приближенно распределение температуры по длине обмотки и, следовательно, ϑ_{max} и ϑ_{min}.

Рассмотрим половину обмотки, состоящую из пазовой и лобовой частей (рис. 5.9). Известны средние значения температур ϑ_a, ϑ_b и длины l_a, $l_b = \frac{1}{2} l_1$.

Распределение температуры в отдельных частях обмотки можно в упрощенном виде представить параболой [аналогично (5.45)]

$$\vartheta_i(x) = a_i + b_i x + c_i x^2; \quad i = a, b,$$

где a_i, b_i, c_i — неизвестные коэффициенты, определяемые из условий симметричности распределения температуры в обмотке, отсутствия отвода теплоты на конце лобовой части и однозначности температуры в общей для обеих частей точке:

$$(d\vartheta_a/dx)_0 = 0; \quad (d\vartheta_b/dx)_{l_b} = 0;$$

$$(d\vartheta_a/dx)_{l_b} = (d\vartheta_b/dx)_0; \quad \vartheta_{ab} = \vartheta_a(l_a) = \vartheta_b(0).$$

Среднее значение температуры элемента обмотки

$$\vartheta_{si} = \frac{1}{l_i}\int_0^{l_i} \vartheta_i(x)\,dx = a_i + \frac{1}{2} b_i l_i + \frac{1}{3} c_i l_i^2, \quad i = a, b.$$

Температуры в характерных точках:

$$\vartheta_a(0) = \vartheta_{ak} = \vartheta_a - \frac{1}{2}(\vartheta_b - \vartheta_a)\frac{l_a}{l_a + l_b}; \tag{5.84}$$

$$\vartheta_{ab} = 3\vartheta_a - 2\vartheta_{ak}; \tag{5.85}$$

$$\vartheta_b(l_b) = \vartheta_{bk} = \frac{3}{2}(\vartheta_b - \vartheta_a) + \vartheta_{ak}. \tag{5.86}$$

Этот расчет справедлив как для $\vartheta_a > \vartheta_b$, так и для $\vartheta_a < \vartheta_b$. Максимальное и минимальное значения температуры обмотки

$$\vartheta_{max} = \max(\vartheta_{ak}, \vartheta_{bk}); \quad \vartheta_{min} = \min(\vartheta_{ak}, \vartheta_{bk}). \tag{5.87}$$

Зная ϑ_s, уточняем потери в обмотке:

$$P_j(\vartheta_s) = P_{j0}(1 + \epsilon_j \vartheta_s).$$

Для полной картины тепловых соотношений в машине и оценки эффективности охлаждения кроме значений температур ϑ_i необходимо знать распределение тепловых потоков в машине, которые определяют по (5.74).

5.10. УТОЧНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ПО МЕТОДУ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ

Уточнить тепловой расчет электрических машин можно несколькими способами: использованием более подробной тепловой схемы; учетом подогрева охлаждающего воздуха в машине; учетом асимметрии охлаждения при односторонней системе вентиляции; уточнением термических сопротивлений.

Рассмотрим уточнение термического сопротивления стержня. Оно складывается из двух составляющих:

внутреннего сопротивления, обусловленного теплопроводностью, $r_v = l/(\lambda S)$;

внешнего сопротивления, обусловленного теплоотдачей, $r_{pi} = 1/(\alpha_i \Pi_i l)$, $i = 1, 2$.

Характерными значениями температуры стержня являются средняя температура ϑ_s и температуры на концах стержня ϑ_0, ϑ_l. Параметр охлаждения ρ^2 можно выразить с помощью основных термических сопротивлений (проводимостей) и потерь:

$$\rho^2 = \left(\frac{1}{r_{p1}} + \frac{1}{r_{p2}} - \epsilon P_0\right) r_v = (g_{p1} + g_{p2} - \epsilon P_0)\frac{1}{g_v}, \tag{5.88}$$

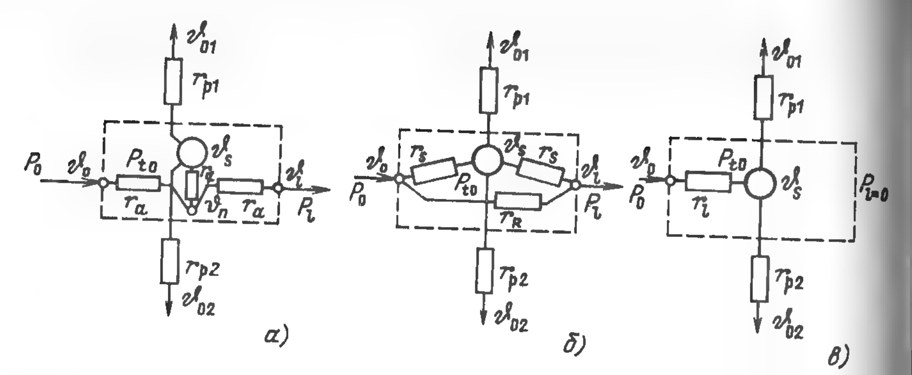


Рис. 5.10. Тепловые схемы замещения стержня:

а – основная; *б* – преобразованная; *в* – при отсутствии охлаждения одного конца стержня

где

$$P_0 = Slp_0 \tag{5.89}$$

– суммарные собственные потери стержня (в холодном состоянии).

На основании аналитического решения и выведенных из этого решения температур ϑ_0 и ϑ_l была составлена основная тепловая схема замещения стержня (рис. 5.10,*а*), включающая источник потерь, вспомогательный узел ϑ_n, два граничных узла (с температурами ϑ_0, ϑ_l). Приведенная схема симметрична, оба сопротивления r_a одинаковы, сопротивление r_q имеет отрицательное значение. Внешние условия охлаждения заданы термическими сопротивлениями r_{p1} и r_{p2} и тепловыми потоками P_0, P_l.

Термические сопротивления r_a, r_q уточненной тепловой схемы выражаются через внутреннее сопротивление r_v:

$$r_a = r_v \frac{1}{\xi_a}; \quad r_q = r_v \frac{1}{\xi_q} < 0, \tag{5.90}$$

где коэффициенты $1/\xi_a$; $1/\xi_q$ зависят от параметра ρ.

Средний узел (ϑ_n) вспомогательный; он не имеет физического смысла, поэтому преобразованием схемы он может быть исключен. Преобразованная тепловая схема (рис. 5.10,*б*) также симметрична, термические сопротивления равны

$$r_s = r_v \frac{1}{\xi_s}; \quad r_k = r_v \frac{1}{\xi_k} < 0, \tag{5.91}$$

а новые поправочные коэффициенты $1/\xi_s$, $1/\xi_k$ также зависят от ρ.

Если один конец стержня не охлаждается ($P_l = 0$), то тепловая схема (рис. 5.10,*в*) содержит только одно внутреннее термическое сопротивление r_l, причем

$$r_l = r_v \frac{1}{\xi_l} > 0.$$

При $\rho^2 > 0$

$$\frac{1}{\xi_a} = \frac{1}{\rho}\left(\operatorname{cth}\rho - \frac{1}{\operatorname{sh}\rho}\right) \in \left(0;\ \frac{1}{2}\right); \tag{5.92}$$

$$\frac{1}{\xi_q} = \frac{1}{\rho}\left(\frac{1}{\operatorname{sh}\rho} - \frac{1}{\rho}\right) \in \left(-\frac{1}{6};\ 0\right); \tag{5.93}$$

$$\rho = (\operatorname{sign}\rho^2)\sqrt{|\rho^2|};$$

$$\frac{1}{\xi_s} = \frac{1}{\rho}\left(\operatorname{cth}\rho + \frac{1}{\operatorname{sh}\rho} - 2\frac{1}{\rho}\right) \in \left(0;\ \frac{1}{6}\right); \tag{5.94}$$

$$\frac{1}{\xi_k} = \frac{1}{\rho}\ \frac{\rho\Delta h\rho - 2(\operatorname{ch}\rho - 1)}{\rho - \operatorname{sh}\rho} \in \left(-1;\ -\frac{1}{2}\right); \tag{5.95}$$

$$\frac{1}{\xi_l} = \frac{1}{\rho}\left(\operatorname{cth}\rho - \frac{1}{\rho}\right) \in \left(0;\ \frac{1}{3}\right). \tag{5.96}$$

Аналогично выводятся также соотношения при $\rho^2 < 0$.

Зависимость коэффициента $1/\xi$ от ρ приведена на рис. 5.11.

Из решения данной тепловой схемы получим температуры ϑ_ϵ, ϑ_0, ϑ_l, ϑ_{01}, ϑ_{02}, на основании которых определяются тепловые потоки в стержне P_0, P_l. Этих данных достаточно для подробного расчета распределения температуры вдоль стержня $\vartheta(x)$. Параметр ρ известен, значения Θ можно вычислить из соотношения

$$\Theta = \left(\frac{1}{r_{p1}}\vartheta_{01} + \frac{1}{r_{p2}}\vartheta_{02} + P_0\right) r_v = (g_{p1}\vartheta_{01} + g_{p2}\vartheta_{02} + P_0)\frac{1}{g_v}. \tag{5.97}$$

Постоянные интегрирования M, N определяют согласно (5.44) или (5.47). Кривая распределения температуры имеет экстремум, если тепловые потоки на концах стержня имеют различные знаки и отличны от нуля, т.е.

$$\operatorname{sign}P_0 \neq \operatorname{sign}P_l \neq 0.$$

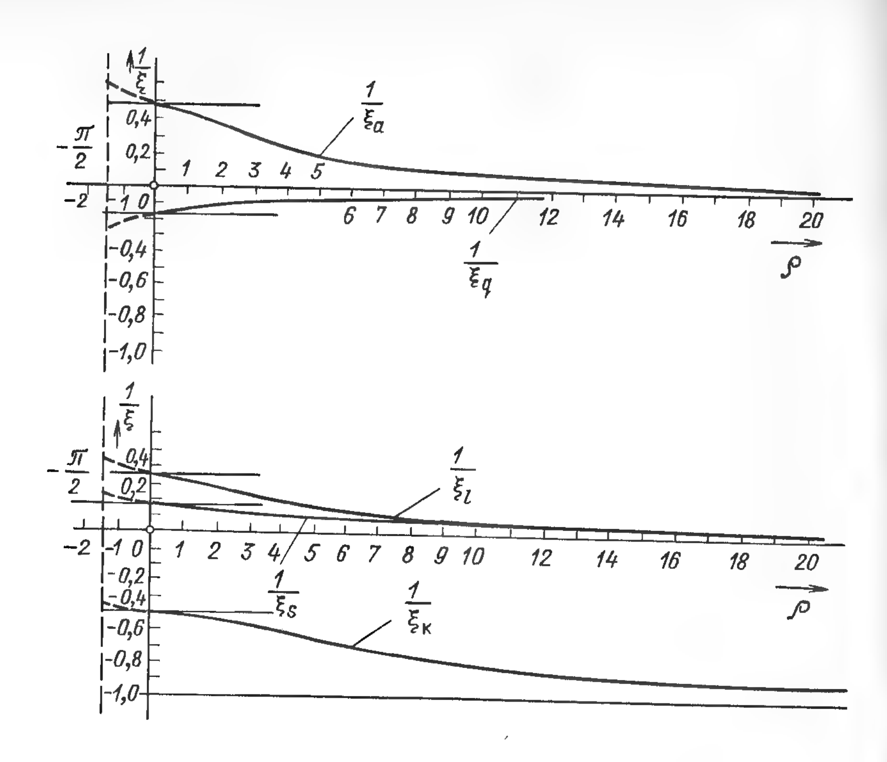


Рис. 5.11. Зависимости коэффициента $1/\xi$ от ρ

Экстремальное значение температуры ϑ_m и соответствующая ему координата точки x_m по длине стержня зависят от параметра ρ:

при $\rho^2 > 0$

$$x_m = \frac{l}{\rho} \operatorname{argth}(-N/M) = \frac{1}{\rho} \frac{1}{2} \ln \frac{1 - N/M}{1 + N/M}; \tag{5.98}$$

$$\vartheta_m = (\operatorname{sign} M) \sqrt{M^2 - N^2} + \frac{Q}{\rho^2};$$

при $\rho^2 = 0$

$$x_m = l \frac{N}{Q}; \quad \vartheta_m = M + \frac{1}{2} N^2 \frac{1}{Q}. \tag{5.98a}$$

Продемонстрируем использование подробной схемы стержня для расчета станины, представив ее в виде двух частей — стержней с разными условиями теплопередачи.

Теплота переходит в станину большей частью из сердечника в местах непосредственного контакта с ними и частично из внутреннего воздуха (в участках над лобовыми частями обмотки, в каналах и т.д.). Так как передача теплоты в среднем и крайних участках станины существенно различается, то возникает перераспределение теплоты в продольном и поперечном направлениях. В этом случае существенны внутренние термические сопротивления. Кроме того, в магнитопроводящей станине по длине сердечника возникают собственные потери, обусловленные переменным магнитным потоком.

Рассмотрим станину закрытых машин (IP44) с продольными ребрами, наружным охлаждением, без внутренней циркуляции воздуха. Для упрощения ограничиваемся половиной станины, считая охлаждение симметричным.

Условия передачи теплоты станиной определяются коэффициентом теплоотдачи α_k с наружной поверхности (его средним значением по длине l_k станины), температурой охлаждающего воздуха ϑ_{ve}, коэффициентом k_{pk} передачи теплоты из сердечника с температурой ϑ_p в станину, коэффициентом теплоотдачи α_{ki} с внутренней поверхности станины. Коэффициент теплопроводности материала станины λ_k. Собственные потери в станине P_k.

При расчете пренебрегаем теплообменом между станиной и щитами; по условию симметрии охлаждения отсутствует тепловой поток между обеими половинами станины. Таким образом, половину станины можно представить в виде последовательно соединенных стержней с продольным и поперечным тепловыми потоками и отсутствием теплового потока на одном конце (согласно рис. 5.12,*б*).

Основные термические сопротивления участка станины над сердечником, отнесенные к половине длины машины:

внешней поверхности станины с числом ребер n_{zk}

$$r_{k1} = \frac{2}{\alpha_k (b_k + 2 h_{zk} \eta_z) l_1 n_{zk}}, \tag{5.99}$$

где η_z — по (5.52) для

$$\rho_z = \sqrt{\frac{2\alpha_k}{\lambda_k e_{zk}}}\, h_{zk}; \tag{5.100}$$

контакта с сердечником

$$r_{pk} = \frac{1}{k_{pk}} \frac{2}{\pi (D_k - 2 e_k) l_1};$$

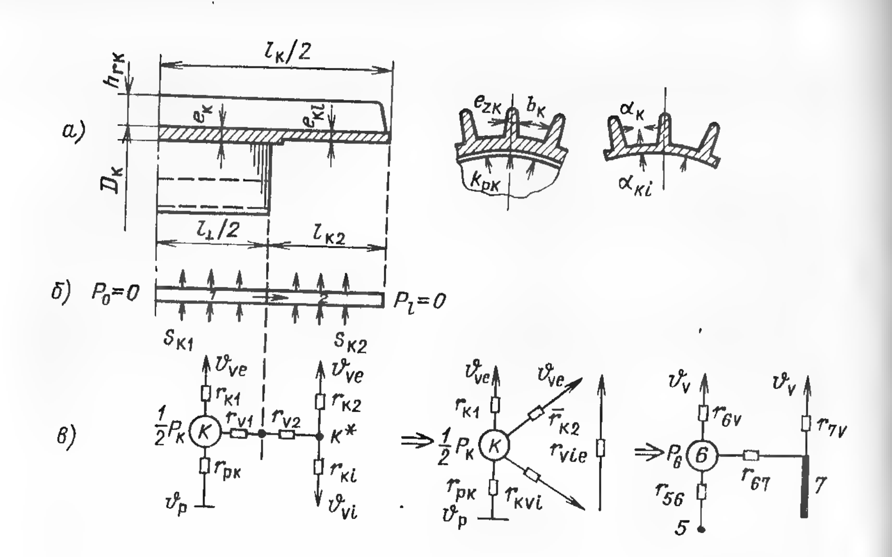


Рис. 5.12. К расчету температуры станины:

а – основные размеры; *б* – представление станины в виде двух стержней; *в* – схема замещения и ее преобразования

теплопроводности вдоль станины

$$r_{kl1} = \frac{1}{2\lambda_k} \frac{1}{\pi(D_k - e_k)l_k + e_{zk} h_{zk} \eta_z n_{zk}}.$$

Собственные потери постоянны и равны $P_{k1} = \frac{1}{2} P_k$.

Аналогично определяются термические сопротивления участка станины над лобовыми частями длиной $l_{k2} = \frac{1}{2} (l_k - l_1)$: r_{k2}, r_{ki}, r_{kl2}; потери $P_{k2} = 0$.

По этим параметрам уточняются внутренние термические сопротивления для течения теплоты вдоль станины. Для участка *1*

$$r_{v1} = r_{kl1} (1/\xi_l)_1$$

с поправочным коэффициентом $(1/\xi_l)_1$ (5.96) для параметра ρ_{k1} [см. (5.88)]

$$\rho_{k1} = \sqrt{\left(\frac{1}{r_{k1}} + \frac{1}{r_{k2}}\right) r_{kl}} > 0.$$

Аналогично рассчитывается внутреннее сопротивление r_{v2} для участка *2*. Частичные внутренние сопротивления можно суммировать: $r_v = r_{v1} + r_{v2}$.

Таким образом определены все термические сопротивления тепловой схемы замещения для половины станины (рис. 5.12,*в*). Схему в таком виде нельзя непосредственно использовать в общей тепловой схеме АД (рис. 5.6), так как там станина представлена только одним узлом. Преобразованием схемы можно исключить узел K^*. Этот узел с ветвями, содержащими сопротивления r_{v2}, r_{k2}, r_{ki}, представляет собой трехлучевую звезду, которую преобразуем в эквивалентный треугольник с результирующими сопротивлениями r_{k2}, r_{kvi}, r_{vie} (рис. 5.12,*б*), затем параллельно соединенные сопротивления r_{k1}, r_{k2} заменяем результирующим

$$r_k = (1/r_{k1} + 1/r_{k2})^{-1}.$$

В общую тепловую схему машины (рис. 5.6) включают термические сопротивления, пересчитанные на всю машину:

$$r_{60} = \frac{1}{2} r_k + r_Q; \; r_{56} = \frac{1}{2} r_k; \; r_{67} = \frac{1}{2} r_{kvi}; \; r_{7v} = \frac{1}{2} r_{vie};$$

$$g_{60} = g_{5v} = 0.$$

Потери $P_6 = 2P_{k1} = P_k$.

В результате решения системы уравнений получаем наряду с остальными температурами ϑ_i также температуру $\vartheta_6 = \vartheta_k$, соответствующую средней температуре участка станины над сердечником на дне межреберных каналов. Это необходимо учитывать при сравнении результатов расчета и измерений на реальной машине.

Аналогично можно провести тепловой расчет при более сложных формах станин: с осевыми каналами для внешнего и внутреннего охлаждающего воздуха, станины с гофрами и т.д.

5.11. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Метод эквивалентных тепловых схем замещения позволяет также исследовать тепловое состояние машины при изменении некоторых параметров. Приведенный ниже анализ справедлив при установившемся тепловом состоянии.

Влияние распределения потерь. Из основного уравнения тепловой схемы (5.75) при $\epsilon_i = 0$ можно вывести общее соотношение:

$$\vartheta_i = \sum_{j=1}^{n} R_{ij} P_j, \quad i, j = 1, 2, \dots, n. \tag{5.101}$$

Уравнение (5.101) выражает в сущности принцип наложения и используется в методе эквивалентных греющих потерь. Так как относительное распределение некоторых потерь в машине не изменяется при $\epsilon_i = 0$, можно выражение (5.101) представить для асинхронных машин в виде

$$\vartheta_i = R_{is}P_s + R_{ir}P_r + R_{i\mathrm{Fe}}P_{\mathrm{Fe}} + R_{im}P_m, \qquad (5.102)$$

где индексы при отдельных видах потерь: s – статора, r – ротора, Fe – стали и m – механические с вентиляционными. Для асинхронных машин со степенью защиты IP23 можно приведенное соотношение упростить до двух членов, так как влияние потерь P_m здесь незначительно и взаимным тепловым влиянием статора и ротора можно пренебречь.

Приведенные соотношения можно использовать для выявления наиболее рационального распределения потерь в машине.

Тепловые характеристики электрической машины. Под тепловой характеристикой машины понимают зависимость температуры основных частей машины (главным образом обмотки) от некоторого параметра (x), т.е. $\vartheta = f(x)$. Таким параметром могут быть полезная мощность машины P, напряжение U, расход охлаждающего воздух Q, температура окружающей среды ϑ_0, отдельные тепловые сопротивления и т.д.

Исследование степени влияния параметров тепловой схемы. Степень влияния определенного исходного параметра x на выходные параметры схемы, как известно из анализа, выражается частной производной по исследуемому параметру, т.е. $\partial\vartheta_i/\partial x$.

При этом различают прямые параметры (проводимости g_{ij}, потери P_i, температура окружающей среды ϑ_0) и косвенные (мощность P, напряжение U, расход Q и т.д.).

Ввиду того что из общего уравнения (5.75) трудно вывести явную зависимость $\vartheta_i = f(x)$ при постоянстве остальных параметров, целесообразно исходить из следующего.

Например, для определения зависимости $\vartheta_i = f(P_i)$ из общего уравнения для i-го источника имеем

$$g_{ii}\vartheta_i - \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n} g_{ij}\vartheta_j = P_{i0} + g_{i0}\vartheta_0, \qquad (5.103)$$

где

$$g_{ii} = \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n} g_{ij} - \epsilon_i P_{i0}.$$

Дифференцированием приведенного уравнения в частных производных по общему параметру x получаем

$$g'_{ii}\vartheta_i + g_{ii}\vartheta'_i - \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n} (g'_{ij}\vartheta_j + g_{ij}\vartheta'_j) = P'_{i0} + g'_{i0}\vartheta_0 + g_{i0}\vartheta'_0, \qquad (5.104)$$

где

$$\vartheta'_i = \partial\vartheta_i/\partial x; \quad g'_{ij} = \partial g_{ij}/\partial x.$$

Выделением неизвестных ϑ'_i, ϑ'_j приведем уравнение (5.104) к виду

$$g_{ii}\vartheta'_i - \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n} g_{ij}\vartheta'_j = (P'_{i0} + g'_{i0}\vartheta_0 + g_{i0}\vartheta'_0) - $$

$$- g'_{ii}\vartheta_i + \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n} g'_{ij}\vartheta_j. \qquad (5.105)$$

Следовательно, дифференцирование системы уравнений в частных производных по x приводит опять к системе линейных уравнений, которая снова может быть представлена в виде матричного уравнения

$$\mathrm{G}\left[\frac{\partial\vartheta}{\partial x}\right] = \mathrm{M}_x, \qquad (5.106)$$

где $\mathrm{G} = \|g_{ij}\|$ – квадратная матрица коэффициентов системы, сходная с первоначальной системой; $\partial\vartheta/\partial x = \|\partial\vartheta_i/\partial x\|$ – матрица-столбец неизвестных производных (чувствительностей); $\mathrm{M}_x = \|m_{ix}\|$ – матрица-столбец свободных членов, зависящих от параметра x.

Для некоторых параметров x элементы m_{ix} матрицы M_x приведены в табл. 5.3.

Аналогично проводится анализ и косвенных параметров. Например, если $x = P$ (мощность машины) и необходимо определить зависимость отдельных потерь P_i от мощности или только $\partial P_i/\partial P$, то отдельные члены m_{ix} имеют вид:

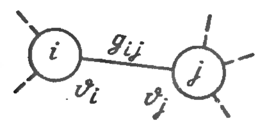
для обмотки

$$m_\rho = \frac{\partial P_c}{\partial P}\frac{l_\rho}{L}(1 + \xi_\rho\vartheta_i); \quad \rho = a, b \dots;$$

для источников, зависящих от P,

$$m_p = \partial P_p/\partial P;$$

Таблица 5.3

Параметр x	Элемент m_{ix} матрицы M_x
Термическая проводимость g_{ij}	$m_i = -\vartheta_i + \vartheta_j$ $m_j = -\vartheta_j + \vartheta_i = -m_i$ $m_k = 0,\ k = 1, 2, \dots, n;\ k \neq i, j$
Термическая проводимость g_{i0}	$m_i = -\vartheta_i + \vartheta_{0i}$ $m_k = 0,\ k = 1, 2, \dots, n;\ k \neq i$
Температура внешнего охлаждающего воздуха ϑ_{0i} 	$m_i = g_{i0}$ $m_k = 0,\ k = 1, 2, \dots, n;\ k \neq i$
Потери в источнике P_{i0}: а) простой источник; б) составной источник	а) $m_i = 1 + \epsilon_i \vartheta_i$; $m_k = 0,\ k = 1, 2, \dots, n;\ k \neq i$; б) $m_\rho = P_\rho (1 + \epsilon_\rho \vartheta_\rho),\ \rho = k, l, m$; $m_j = 0,\ j = 1, 2, \dots, n;\ j \neq \rho$

для независимых источников

$$m_j = 0.$$

Знание степени влияния можно использовать при пересчете температуры ϑ_i, если x изменяется на Δx, т.е.

$$\vartheta_i^* = (\vartheta_i)_n + \left(\frac{\partial \vartheta_i}{\partial x}\right)_n \Delta x, \tag{5.107}$$

либо изменяются несколько параметров x_i:

$$\vartheta_i^* = (\vartheta_i)_n + \sum_i \left(\frac{\partial \vartheta_i}{\partial x_i}\right)_n \Delta x_i . \tag{5.108}$$

Этот пересчет тем точнее, чем меньше Δx_i.

5.12. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ

Общее уравнение, описывающее неустановившееся тепловое состояние, имеет вид (5.26). Для решения этого уравнения необходимо кроме граничных условий задание начальных условий, соответствующих $t = 0$. Решение такой задачи более сложно и трудоемко, чем решение стационарных тепловых режимов, даже при одномерном теплообмене. В связи с этим заслуживает внимания удобный метод Шмидта приближенного графического решения одномерной нестационарной тепловой задачи при различных краевых и начальных условиях.

Для практического решения этих тепловых состояний электрических машин удобен метод эквивалентных тепловых схем, включающий новые элементы, характеризующие теплоемкость частей машины.

Теплоемкость тела (части машины) в общем определена соотношением

$$C = c\rho V = cM,$$

где V – объем; c – его удельная теплоемкость; M – масса тела.

В эквивалентной тепловой схеме теплоемкости присоединяют между соответствующей точкой схемы (источник или узел) и основной точкой, отражающей температуру окружающей среды.

При решении нестационарных тепловых режимов будем полагать условия охлаждения (ϑ_0) и теплоемкости постоянными, источники потерь – постоянными или зависящими от ϑ по (5.66).

Приведем решение для простого случая – однородного тела (рис. 5.13) с внутренним источником теплоты ($\epsilon \neq 0$) и с теплоемкостью C, охлаждаемого по одной ветви с результирующей тепловой проводимостью g и с постоянной температурой ϑ_{01}. Эта ветвь может заменять большее число ветвей с различными температурами.

Исходное дифференциальное уравнение неустановившегося теплового состояния

$$C \frac{d\vartheta}{dt} + g(\vartheta - \vartheta_{01}) = P_{10}(1 + \epsilon\vartheta). \tag{5.109}$$

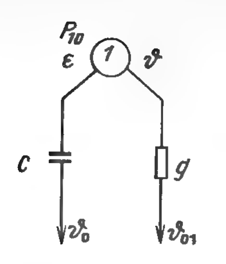


Рис. 5.13. Схема замещения однородного тела с внутренним источником теплоты

Его общее решение

$$\vartheta(t) = Ke^{\rho t} + \vartheta_\infty, \qquad (5.110)$$

где

$$\rho = -\frac{1}{C}(g - \epsilon P_{10}) < 0, \ \tau = -\frac{1}{\rho} > 0; \qquad (5.111)$$

$$\vartheta_\infty = (P_{10} + g\vartheta_{01})/(g - \epsilon P_{10}). \qquad (5.112)$$

Здесь τ – постоянная времени нагревания; ϑ_∞ – установившееся значение температуры при $t \to \infty$; K – постоянная интегрирования. Для начального условия $t = 0$, $\vartheta = \vartheta(0)$ получим $K = \vartheta(0) - \vartheta_\infty$ и результирующее решение

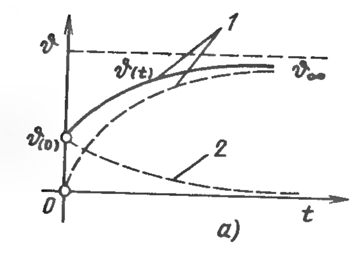
$$\vartheta(t) = \vartheta_\infty(1 - e^{\rho t}) + \vartheta(0)e^{\rho t}, \qquad (5.113)$$

где ϑ – средняя температура тела для момента времени t. При $\vartheta(0) = 0$ получаем основную кривую нагревания и при $\vartheta_\infty = 0$ – кривую охлаждения (рис. 5.14).

Аналогично решение неустановившихся тепловых состояний более сложных тел (систем, состоящих из большого числа тел).

Для отдельных точек (источников, узлов) сети получаем уравнение в общем виде:

$$C_i \frac{d\vartheta_i}{dt} + \sum_{\substack{j \\ i \neq j}} g_{ij}(\vartheta_i - \vartheta_j) +$$



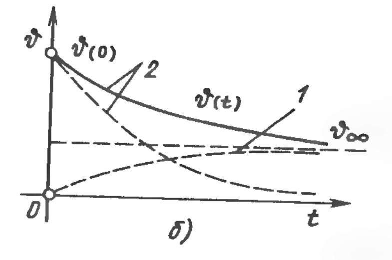


Рис. 5.14. Кривые нагревания (1) и охлаждения (2)

$$+ g_{i0}(\vartheta_i - \vartheta_{i0}) = P_{i0}(1 + \epsilon_i\vartheta_i), \quad i, j = 1, 2, \ldots, n. \qquad (5.114)$$

Систему уравнений (5.114) можно записать в виде

$$\mathbf{C}\frac{d\boldsymbol{\vartheta}}{dt} + \mathbf{G}\boldsymbol{\vartheta} = \mathbf{P}, \qquad (5.115)$$

где $\mathbf{C}$ – диагональная матрица теплоемкостей, остальные матрицы – $\mathbf{G}$, $\boldsymbol{\vartheta}$, $\mathbf{P}$ – имеют те же значения, что и в уравнении (5.75) для установившегося режима.

Прямое аналитическое решение для большого числа тел ($n > 3$) затруднительно. Наиболее удобны методы, использующие преобразование Лапласа или матричное исчисление. В последнем случае можно использовать метод (и программы) для решения собственных величин и собственных векторов матрицы.

Результатом решения являются уравнения кривых температуры для отдельных точек схемы, которые при начальных условиях $t = 0$, $\vartheta_i = \vartheta_i(0)$ имеют вид

$$\vartheta_i(t) = \vartheta_{i\infty} + \sum_l [\vartheta_{il} + \sum_j h_{ilj}\vartheta_j(0)]e^{\rho_l t}; \qquad (5.116)$$

здесь $\vartheta_{i\infty}$ – установившаяся температура точки; ϑ_{il} – составляющая температуры; h_{ilj} – вспомогательные коэффициенты, выражающие влияние начальной температуры $\vartheta_j(0)$; $\vartheta_j(0)$ – начальная температура точки сети; $\rho_l = -1/\tau_l$.

5.13. НАГРЕВ ПРИ ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ

При расчете машины для повторно-кратковременных режимов следует исходить из кривой изменения нагрузки, которая периодически повторяется, или, более просто, из заданного коэффициента нагрузки.

Целью теплового расчета является определение максимальной температуры, которая повторяется через определенные промежутки времени, а также диапазона изменения температур.

Такие задачи также можно решить методом эквивалентных тепловых схем. Способ решения приведен на примере однородного тела.

Предположим, что цикл состоит из двух участков длительностью по времени t_a, t_b (рис. 5.15,*а*). Параметры тепловой схемы для обоих участков различны, так как изменяются условия работы – нагревание, охлаждение; при этом теплоемкость C постоянна.

Пусть на участке a температура тела увеличивается с ϑ_b до ϑ_a, а на участке b уменьшается до ϑ_b, после чего цикл повторяется. Тогда справедливы следующие уравнения:

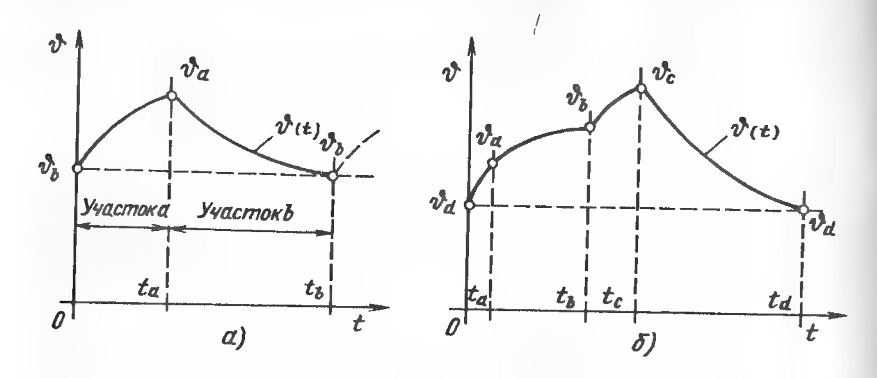


Рис. 5.15. Изменение температуры при повторно-кратковременном режиме

для участка a

$$\vartheta_a(t_a) \equiv \vartheta_a = \vartheta_{a\infty}(1 - e^{\rho_a t_a}) + \vartheta_b e^{\rho_a t_a};$$

для участка b

$$\vartheta_b(t_b) \equiv \vartheta_b = \vartheta_{b\infty}(1 - e^{\rho_b t_b}) + \vartheta_b e^{\rho_b t_b}. \quad (5.117)$$

Для упрощения введем вспомогательные величины

$$\sigma_\nu = e^{\rho_\nu t_\nu}; \quad \vartheta^*_\nu = \vartheta_{\nu\infty}(1 - \sigma_\nu); \quad (\nu = a, b). \quad (5.118)$$

Запишем систему двух линейных уравнений (5.117) для неизвестных температур ϑ_a, ϑ_b в матричном виде:

$$\left\|\begin{matrix} 1 & -\sigma_a \\ -\sigma_b & 1 \end{matrix}\right\| \left\|\begin{matrix} \vartheta_a \\ \vartheta_b \end{matrix}\right\| = \left\|\begin{matrix} \vartheta^*_a \\ \vartheta^*_b \end{matrix}\right\|. \quad (5.119)$$

Решением этой системы являются известные соотношения для цикла с двумя участками времени

$$\vartheta_a = \frac{1}{1 - \sigma_a \sigma_b}(\vartheta^*_a + \sigma_a \vartheta^*_b); \quad \vartheta_b = \frac{1}{1 - \sigma_a \sigma_b}(\sigma_b \vartheta^*_a + \vartheta^*_b). \quad (5.120)$$

Для четырех участков a, b, c, d (рис. 5.15,б) имеем систему уравнений

$$\left\|\begin{matrix} 1 & 0 & 0 & -\sigma_a \\ -\sigma_b & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_c & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_d & 1 \end{matrix}\right\| \left\|\begin{matrix} \vartheta_a \\ \vartheta_b \\ \vartheta_c \\ \vartheta_d \end{matrix}\right\| = \left\|\begin{matrix} \vartheta^*_a \\ \vartheta^*_b \\ \vartheta^*_c \\ \vartheta^*_d \end{matrix}\right\|. \quad (5.121)$$

Решая эту систему, получаем температуры ϑ_ν для границ участков времени.

5.14. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕПЛОВЕНТИЛЯЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРЕХФАЗНЫХ АД

Вентиляционный и тепловой расчеты предназначены для предварительного контроля температуры машины в процессе поиска оптимального варианта электромагнитного расчета АД. При этом с точки зрения теплового состояния двигателя считаются основными следующие лимитеры: средняя температура обмотки статора, максимальная температура обмотки статора, скорость нарастания температуры обмотки статора машины в режиме короткого замыкания.

С точки зрения самого расчета речь идет в сущности о поверочном расчете, отличающемся тем, что вместо подробных чертежей машины исходят из размеров и конструктивных данных, выведенных из основных размеров машины (внешнего диаметра и длины сердечника, высоты оси) и основанных на принципах предполагаемого конструктивного решения серии.

Для решения были приняты следующие упрощающие предпосылки:

расчет распространяется на низковольтные АД с короткозамкнутым ротором, исполнения IP44, с ребристой станиной, без внутренней циркуляции воздуха;

заданы основные данные конструкции частей машины (станина, щиты, вентилятор).

Тепловентиляционный расчет базируется на результатах электромагнитного расчета и промежуточного расчета, определяющего необходимые конструктивные размеры машин.

Вентиляционный расчет ограничивается только определением расхода воздуха во внешней сети Q_c и потерь P_{ve} на вентиляцию. Основную роль при этом играет геометрия вентиляторного узла; влияние оребрения станины сказывается в меньшей мере.

Необходимый расход воздуха Q_c определяют известными методами; потери на вентиляцию – исходя из соотношения

$$P_{ve} = \lambda_{ve} H_t Q_c = \lambda_{ve} \frac{\rho}{2} u^2_{2ve} \frac{\pi}{4} D_{2ve} \approx \lambda_{ve} D^2_{2ve} u^3_{2ve}, \quad (5.122)$$

Т а б л и ц а 5.4

Число лопаток	Относительная ширина лопаток	λ_{ve} при δ, равном		
		0,7	0,8	0,9
5	0,20	0,150	0,147	0,135
	0,25	0,175	0,173	0,165
7, 9	0,20	0,158	0,156	0,140
	0,25	0,190	0,190	0,185

где λ_{ve} – эмпирический коэффициент; D_{2ve} – внешний диаметр вентилятора; u_{2ve} – окружная скорость вентилятора.

Для вентиляторов, удовлетворяющих следующим условиям: число лопаток n_{2ve} = 5, 7, 9; относительный диаметр входа $\overline{\delta} = D_{a1}/D_{2ve}$ = = 0,7÷0,93; относительная ширина лопатки $\overline{b} = b/D_{2ve}$ = 0,2÷0,25, значения λ_{ve} могут быть определены из табл. 5.4.

Для предварительного расчета достаточно принять λ_{ve} = 0,17.

Тепловой расчет базируется на схеме замещения, представленной на рис. 5.5.

При расчете температуру окружающей среды принимают равной T_0 = = 20 °С; эта температура при расчете превышений температур частей машины соответствует нулевому нагреву ($\vartheta_0 = 0$).

Дополнительно рассчитывают среднее ϑ_s и максимальное ϑ_{sm} превышения температуры обмотки статора.

Расчет скорости нарастания температуры обмотки статора при заторможенном роторе $d\vartheta_s/dt$ включен в электромагнитный расчет машины и поэтому здесь не приводится.

Исходные данные для проведения тепловентиляционного расчета приведены в табл. 5.5. Обозначения величин, принятые в методике, соответствуют разработанным СССР и принятым странами-членами Интерэлектро.

Вентиляционный расчет внешнего охлаждающего контура выполняется в следующей последовательности.

Окружная скорость вентилятора, м/с,

$$u_{2ve} = \frac{\pi}{60} 10^{-3} D_{fa} n. \tag{5.123}$$

Подача вентилятора, м³/с,

$$Q_c = 0{,}905 \cdot 10^{-11} D_{fa}^3 n e^{-0{,}02 n_{gr}} \ln \frac{14{,}25 h_{gr}^2 n_{gr}}{(n_{gr} - 1)(b_{gr} + b_{gk}) D_g}. \tag{5.124}$$

Потери на вентиляцию, Вт,

$$P_{ve} = \lambda_{ve} \cdot 0{,}6 \cdot 10^{-6} \pi D_{fa}^2 u_{2ve}^3/4 = 0{,}471 \cdot 10^{-6} \lambda_{ve} D_{fa}^2 u_{2ve}^3. \tag{5.125}$$

Т а б л и ц а 5.5

Наименование	Обозначение	Единица
Сердечник статора		
Внешний диаметр	D_{a1}	мм
Внутренний диаметр	D_{i1}	мм
Длина	l_1	мм
Число пазов	z_1	–
Высота паза	h_{z1}	мм
Средняя ширина зубца статора	b_{z1}	мм
Высота спинки	h_{j1}	мм
Коэффициент заполнения сердечника сталью	K_j	–
Периметр паза статора	Π_{g1}	мм
Ширина шлица паза	b_{c1}	мм
Ширина или диаметр дна паза	b_{g1}	мм
Потери в спинке статора	P_{j1}	Вт
Потери в зубцах статора	P_{z1}	Вт
Коэффициент теплопроводности стали	λ_j	Вт/(м·°С)
Обмотка статора		
Сечение эффективного проводника	q_{Cu1}	мм²
Число эффективных проводников в пазу статора	N_{n1}	–
Длина лобовой части	l_{s1}	мм
Длина вылета лобовой части	l_{ss1}	мм
Высота катушки	h_{kk}	мм
Ширина катушки	b_{kk1}	мм
Коэффициент теплопроводности обмотки	λ_l	Вт/(м·°С)
Потери	P_{c1}	Вт
Сердечник ротора		
Внутренний диаметр	D_{i2}	мм
Внешний диаметр	D_{a2}	мм
Число пазов	z_2	–
Высота паза	h_{z2}	мм
Средняя ширина зубца ротора	b_{z2}	мм
Потери в зубцах ротора	P_{z2}	Вт
Клетка ротора (литая)		
Общая площадь паза двойной клетки	Q	мм²
Площадь паза ротора простой клетки	Q_2	мм²
Периметр паза ротора простой клетки или верхнего паза двойной клетки	Π_{g2}	мм
Периметр нижнего паза двойной клетки	Π_{g3}	мм
Потери	P_{c2}	Вт
Высота короткозамыкающего кольца	h_{r2}	мм
Длина короткозамыкающего кольца	l_{r2}	мм
Длина лопатки ротора	l_{w2}	мм
Число лопаток ротора	N_{w2}	–

Таблица 5.5 (окончание)

Наименование	Обозначение	Единица
Воздушный зазор		
Высота	δ	мм
Вентиляторный узел		
Расчетный наружный диаметр вентилятора	D_{fa}	мм
Диаметр кожуха	D_d	мм
Длина участка кожуха, закрывающего ребра станины	l_{dg}	мм
Станина		
Диаметр станины по дну межреберных каналов	D_g	мм
Длина станины	l_g	мм
Толщина станины	h_g	мм
Число ребер	n_{gr}	–
Средняя высота ребра	h_{gr}	мм
Средняя толщина ребра	b_{gr}	мм
Средняя ширина межреберного канала	b_{gk}	мм
Длина ребра	l_{gr}	мм
Коэффициент теплопроводности материала станины	λ_g	Вт/(м·°С)
Подшипниковый щит		
Толщина	h_s	мм
Длина цилиндрической поверхности	l_s	мм

Тепловой расчет начинают с определения вспомогательных величин. Физические свойства воздуха:
внешний воздух ($\vartheta_l = 20\,°C$):

$\lambda_l = 0{,}0292$ Вт/(м·°С), $\nu_l = 1{,}51 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $c_{vl} = 1255$ Дж/(кг·°С);

внутренний воздух ($\vartheta_i \approx 70\,°C$):

$\lambda_i = 0{,}0257$ Вт/(м·°С), $\nu_i = 1{,}99 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $c_{vi} = 1037$ Дж/(кг·°С).

Окружная скорость ротора, м/с,

$$u_{2r} = \frac{\pi}{60} 10^{-3} D_{a2} n. \qquad (5.126)$$

Далее рассчитывают параметры тепловой схемы замещения АД, состоящего из следующих элементов.

Станина. Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С), максимальный (на выходе в межреберные каналы станины)

$$\alpha_{k0} = 0{,}64 \lambda_l \mathrm{Re}_k^{0{,}52} / d_{Hk}, \qquad (5.127)$$

средний по длине станины

$$\alpha_k = \xi_k \alpha_{k0} \left\{ \frac{h_{gr}}{l_{gr}} + \frac{d_{Hk} \cdot 10^{-3}}{\gamma_r l_{gr}} \left[1 - e^{-\frac{\gamma_r}{d_{Hk}}(l_{gr} - h_{gr}) \cdot 10^{-3}} \right] \right\}, \qquad (5.128)$$

где γ_r — параметр оребрения станины:

$$\gamma_r = \left(11{,}8 - 0{,}437 \frac{D_g \cdot 10^{-3}}{d_{Hk}} \right) \cdot 10^{-2}. \qquad (5.129)$$

Ширина дна межреберного канала, мм,

$$b'_{gk} = b_{gk} \frac{D_g}{D_g + h_{gr}}. \qquad (5.130)$$

Длина участка станины над лобовыми частями обмотки, мм,

$$l'_g = 0{,}5 (l_g - l_1). \qquad (5.131)$$

Вспомогательные тепловые величины, 1/м:
для ребра

$$m_{zk} = \sqrt{\frac{2 \alpha_k \cdot 10^3}{\lambda_g b_{gr}}}; \qquad (5.132)$$

для концевого участка станины

$$m_{kk} = \sqrt{\frac{\alpha_k (2 h_{gr} + b'_{gk}) \cdot 10^3}{\lambda_g (h_{gr} b_{gr} + b_{gk} l'_g)}}. \qquad (5.133)$$

Коэффициент температурного поля станины

$$k_k = \left[1 - \frac{1}{\sqrt[3]{1 + (0{,}5 \cdot 10^{-3} m_{zk} l_1)^3} + \frac{l_1}{2 l'_g} \sqrt[3]{1 + (m_{kk} l_g \cdot 10^{-3})^3}} \right]^{-1}. \qquad (5.134)$$

Высота канала на выходе воздуха из вентиляторного узла, мм,

$$h_{kv} = 0{,}5 (D_d - D_g). \qquad (5.135)$$

Сечение канала на выходе воздуха из вентиляторного узла, м^2,

$$S_{k0} = [\pi(D_d - h_{kv})h_{kv} - h_{gr} b_{gr} h] \cdot 10^{-6}, \qquad (5.136)$$

где $h = \min(h_{gr}, h_{kv})$.

Расходная составляющая скорости воздуха на входе в межреберные каналы станины, м/с,

$$v_{ka} = Q_c / S_{k0}. \qquad (5.137)$$

Средняя эффективная скорость воздуха на входе в межреберные каналы станины, м/с,

$$v_{k0} = \sqrt{(0{,}5u_{2ve})^2 + v_{ka}^2}. \qquad (5.138)$$

Гидравлический диаметр межреберных каналов станины, м,

$$d_{Hk} = 4\frac{b_{gk} h_{gr}}{b_{gk} + 2h_{gr}} 10^{-3}. \qquad (5.139)$$

Число Рейнольдса на входе воздуха в межреберные каналы

$$\mathrm{Re}_k = d_{Hk} v_{k0} / \nu_l. \qquad (5.140)$$

Боковая поверхность ребра станины, м^2.

$$A_{zk1} = 2h_{gr} l_{gr} \cdot 10^{-6}. \qquad (5.141)$$

Поверхность дна межреберного канала, м^2,

$$A_{k1} = b'_{gk} l_{gr} \cdot 10^{-6}. \qquad (5.142)$$

Термическая проводимость станины, Вт/°С,

$$g_k = \alpha_k k_k n_{gr} \left[\frac{A_{zk1}}{\sqrt[3]{1 + (m_{zk} h_{gr} \cdot 10^{-3})^3}} + A_{k1} \right]. \qquad (5.143)$$

Термическая проводимость потока охлаждающего воздуха, Вт/°С,

$$g_Q = 2c_{ve} Q_c. \qquad (5.144)$$

Результирующая термическая проводимость, Вт/°С,

$$g_{zv} = (1/g_k + 1/g_Q)^{-1}. \qquad (5.145)$$

Контакт сердечник–станина. Удельное термическое сопротивление контакта, м^2 · °С/Вт:

чугунная станина

$$1/k_{pk} = (15{,}6 + 0{,}117D_{a1}) \cdot 10^{-5}; \qquad (5.146)$$

алюминиевая станина

$$1/k_{pk} = 1{,}4 \cdot 10^{-3}. \qquad (5.146а)$$

Результирующее сопротивление контакта, °С/Вт,

$$r_{pk} = \frac{1}{k_{pk}} \frac{10^6}{\pi D_{a1} l_1}. \qquad (5.147)$$

Подшипниковые щиты. Коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м^2 · °С): с внутренней поверхности щитов

$$\alpha_{si} = \xi_{si}(15 + 5{,}37u_{2r}^{0,8}); \qquad (5.148)$$

с наружной поверхности щита со стороны вентилятора

$$\alpha'_{sl} = \xi'_{sl}(20 + 5{,}1u_{2ve}^{0,8}); \qquad (5.149)$$

с наружной поверхности щита со стороны рабочего конца вала

$$\alpha''_{sl} = \xi''_{sl} \alpha'_{sl}. \qquad (5.149а)$$

Поверхности охлаждения щита, м^2:
внутренняя

$$A_{si} \approx \pi D_{a1}\left(\frac{1}{4} D_{a1} + l_s - h_s\right) \cdot 10^{-6}; \qquad (5.150)$$

наружная

$$A_{sl} \approx \pi D_g \left(\frac{1}{4} D_g - l_s\right) \cdot 10^{-6}. \qquad (5.151)$$

Результирующие термические проводимости, Вт/°С:
от внутреннего воздуха к щиту

$$g_{68} = 2\alpha_{si} A_{si}; \qquad (5.152)$$

от щитов к окружающему воздуху

$$g_{80} = (\alpha'_{sl} + \alpha''_{sl}) A_{sl}. \qquad (5.153)$$

Сердечник статора. Среднее сечение зубцов, м^2,

$$Q_{z1} = b_{z1} l_1 k_j z_1 \cdot 10^{-6}. \qquad (5.154)$$

Сечение спинки, м^2,

$$Q_{js} = \pi(D_{a1} - h_{j1}) l_1 k_j \cdot 10^{-6}. \qquad (5.155)$$

Внутренняя поверхность сердечника, м^2,

$$A_{\delta s} = (\pi D_{i1} - z_1 b_{c1}) l_1 k_j \cdot 10^{-6}. \qquad (5.156)$$

Термическое сопротивление половины зубцов, °С/Вт,

$$r_{zs} = h_{z1} \cdot 10^{-3} / (2\lambda_j Q_{z1}). \qquad (5.157)$$

Термическое сопротивление половины спинки, °С/Вт,

$$r_{js} = h_j \cdot 10^{-3} / (2\lambda_j Q_{js}). \qquad (5.158)$$

Результирующая термическая проводимость, Вт/°С:
между зубцами и спинкой статора

$$g_{34} = 1/(r_{zs} + r_{gs}); \qquad (5.159)$$

между спинкой статора и станиной

$$g_{47} = 1/(r_{js} + r_{pk}). \qquad (5.160)$$

Сердечник ротора. Среднее сечение зубцов, м^2,

$$Q_{z2} = b_{z2} l_1 z_2 k_j \cdot 10^{-6}. \qquad (5.161)$$

Наружная поверхность сердечника, м^2,

$$A_{\delta r} = \pi D_{a2} l_1 k_j \cdot 10^{-6}. \qquad (5.162)$$

Термическое сопротивление половины зубцов, °С/Вт,

$$r_{zr} = k_{z2} \cdot 10^{-3} / (2\lambda_j Q_{z2}). \qquad (5.163)$$

Воздушный зазор. Число Рейнольдса

$$\mathrm{Re}_\delta = \frac{u_{2r}\delta}{\nu_i} 10^{-3}. \qquad (5.164)$$

Число Нуссельта:
при $\mathrm{Re}_\delta < 4 \cdot 10^2$

$$\mathrm{Nu}_\delta = 2; \qquad (5.165)$$

при $\mathrm{Re}_\delta \geqslant 4 \cdot 10^2$

$$\mathrm{Nu}_\delta = 0{,}23 \left(\frac{2\delta}{D_{i1}}\right)^{0,25} \mathrm{Re}_\delta^{0,5}. \qquad (5.165а)$$

Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2 · °С),

$$\alpha_\delta = \xi_\delta \frac{\lambda_i \mathrm{Nu}_\delta}{2\delta} 10^3. \qquad (5.166)$$

Обмотки статора. Общее сечение проводов в пазах, м^2,

$$S_{vs} = q_{cu1} N_{n1} z_1 \cdot 10^{-6}. \qquad (5.167)$$

Внутренняя термическая проводимость обмотки (продольная), Вт/°С,

$$g_{12} = 6\lambda_l S_{vs} \cdot 10^3 / (l_1 + l_{s1}). \qquad (5.168)$$

Обмотка ротора. Термическое сопротивление контакта стержень–сердечник, °С/Вт,

$$r_{dr} = 1/(\alpha_{dr} A_{\delta r}). \qquad (5.169)$$

Коэффициент теплоотдачи с поверхности зубцов, Вт/(м^2 · °С),

$$\alpha_{cr} = \xi_{cr} \cdot 16{,}5 u_{2r}^{0,65}. \qquad (5.170)$$

Поверхность короткозамыкающего кольца с учетом вентиляционных лопаток одной стороны, м^2,

$$A_c = [\pi(D_{a2} - h_{r2})(h_{r2} + 2l_{r2}) + 2N_{w2} h_{r2}(l_{w2} - h_{r2})] \cdot 10^{-6}. \qquad (5.171)$$

Результирующие термические проводимости, Вт/°С:
от клетки к внутреннему воздуху

$$g_{56} = 2\left(\frac{2}{g_{vr}} + \frac{1}{\alpha_{cr} A_c}\right)^{-1}; \qquad (5.172)$$

от клетки ротора к зубцам статора

$$g_{35} = \frac{1}{r_{dr} + r_{zr} + \dfrac{1}{2\alpha_\delta}\left(\dfrac{1}{A_{\delta r}} + \dfrac{1}{A_{\delta s}}\right) + r_{2s}}. \qquad (5.173)$$

Потери в вентиляционных лопатках ротора, Вт,

$$P_{vi} = 1{,}2 l_{w2} D_{a2} u_{2r}^3 \cdot 10^{-6}. \qquad (5.174)$$

Распределение потерь по источникам. Температурные коэффициенты обмоток, °С$^{-1}$,

$$\epsilon_s = \frac{1}{235 + 20} = 0{,}00392; \quad (5.175)$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{245 + 20} = 0{,}00377; \quad (5.176)$$

$$k_{ts} = 1 + \epsilon_s \Delta\vartheta_{j1}; \quad (5.177)$$

$$k_{tr} = 1 + \epsilon_r \Delta\vartheta_{j2}. \quad (5.178)$$

Потери, Вт:

в лобовых частях обмотки статора

$$P_{10} = P_{c1s}/k_{ts}, \quad (5.179)$$

где P_{c1s} – по (5.71);
в пазовых частях обмотки статора

$$P_{20} = P_{c1n}/k_{ts}, \quad (5.180)$$

где P_{c1n} – по (5.70);
в зубцах статора

$$P_3 = P_{z1}; \quad (5.181)$$

в спинке статора

$$P_4 = P_{j1}; \quad (5.182)$$

в клетке ротора

$$P_{5,0} = P_{c2}/k_{tr}; \quad (5.183)$$

в зубцах ротора

$$P_{5,k} = P_{z2}; \quad (5.184)$$

во внутреннем воздухе

$$P_6 = P_{vi}. \quad (5.185)$$

Превышение температуры охлаждающего воздуха, вызванное потерями на вентиляцию, °С,

$$\vartheta_v = \frac{P_{ve}}{c_{ve} Q_c} = \frac{2}{g_Q} P_{ve}. \quad (5.186)$$

Далее преобразуем тепловую схему замещения рис. 5.5 к рис. 5.8 и пересчитываем термические проводимости, Вт/°С:

$$g_{4v} = \left(\frac{1}{g_{47}} + \frac{1}{g_{zv}} \right)^{-1}; \quad (5.187)$$

$$g_{60} = \left(\frac{1}{g_{68}} + \frac{1}{g_{80}} \right)^{-1}; \quad (5.188)$$

$$G_1 = g_{12} + g_{16} - \epsilon_s P_{10}; \quad (5.189)$$

$$g_{26} = \frac{1}{G_1} g_{12} g_{16}; \quad (5.190)$$

$$G_5 = g_{35} + g_{56} - \epsilon_r P_{50}; \quad (5.191)$$

$$g_{36} = \frac{1}{G_5} g_{35} g_{56}. \quad (5.192)$$

Пересчитываем распределения потерь, Вт:

$$P_{12} = P_{10} \frac{g_{12}}{G_1}; . \quad (5.193)$$

$$P_{16} = P_{10} \frac{g_{16}}{G_1}; \quad (5.194)$$

$$P_{5,3,0} = P_{5,0} \frac{g_{35}}{G_5}; \quad (5.195)$$

$$P_{5,6,0} = P_{5,0} \frac{g_{56}}{G_5}; \quad (5.196)$$

$$P_{5,3,k} = P_{5,k} \frac{g_{35}}{G_5}; \quad (5.197)$$

$$P_{5,6,k} = P_{5,k} \frac{g_{56}}{G_5}. \quad (5.198)$$

Рассчитываем свободные члены b_i, Вт:

$$b_1 = P_{2,0} + P_{1,2}; \quad (5.199)$$

$$b_2 = P_3 + P_{5,3,0} + P_{5,3,k}; \quad (5.200)$$

$$b_3 = P_4 + g_{4v} \vartheta_v; \quad (5.201)$$

$$b_4 = P_6 + P_{1,6} + P_{5,6,0} + P_{5,6,k}. \quad (5.202)$$

Расчет повышенной температуры. Из решения уравнения $\mathbf{A}\vartheta = \mathbf{B}$ получаем

$$\vartheta_2,\ \vartheta_3,\ \vartheta_4,\ \vartheta_6.$$

Превышение температуры лобовых частей обмотки статора, °С,

$$\vartheta_1 = \frac{1}{G_1}(P_{10} + g_{12}\vartheta_2 + g_{16}\vartheta_6). \tag{5.203}$$

Среднее превышение температуры обмотки статора, °С,

$$\vartheta_s = \vartheta_1\left(\frac{l_{s1}}{l_1 + l_{s1}}\right) + \vartheta_2\left(\frac{l_1}{l_1 + l_{s1}}\right). \tag{5.204}$$

Максимальное превышение температуры обмотки статора (лобовые части со стороны, противоположной вентилятору), °С,

$$\vartheta_{max\,s} = \vartheta_1 + 0{,}5(\vartheta_2 - \vartheta_1)\left(\frac{l_{s1}}{l_1 + l_{s1}}\right) + g_{4v}(\vartheta_4 - \vartheta_v)\,2/g_Q + \vartheta_v. \tag{5.205}$$

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ШУМ И ВИБРАЦИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

6.1. АНАЛИЗ УРОВНЕЙ ШУМА И ВИБРАЦИЙ СОВРЕМЕННЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Предельно допустимые уровни шума асинхронных двигателей. Допустимые уровни шума и методики их измерения определены международными (МЭК, СТ СЭВ) и многими национальными (ГОСТ, DIN, CN, BS) стандартами. Так как в основу этих документов, как правило, положены уровни шума машин передовых фирм, то они отражают в определенном смысле достигнутый конструктивно-технологический уровень, а не требования к шуму с точки зрения охраны и гигиены труда. Стандарты отличаются значениями предельных уровней шума, зависимостей уровня шума от номинальной мощности, номинальной частоты вращения, режима работы АД и методами испытаний.

Публикация МЭК 34-9-72 устанавливает предельно допустимые уровни шума АД мощностью до 400 кВт в режиме холостого хода в зависимости от их степени защиты (табл. 6.1). Допускается нормирование уровней шума и звуковой мощности по шкале А.

Стандарт СТ СЭВ 1348-78 отличается от Публикации МЭК тем, что распространяется на АД мощностью до 1000 кВт и предусматривает

Таблица 6.1

Номинальная мощность, кВт	Уровень звуковой мощности, дБ (по шкале А), машин исполнения IP44 с синхронными частотами вращения, об/мин			
	750	1000	1500	3000
До 1,1	76	79	80	84
Свыше 1,1 до 2,2	79	80	83	89
Свыше 2,2 до 5,5	82	84	87	93
Свыше 5,5 до 11	85	88	91	97
Свыше 11 до 22	89	93	96	101
Свыше 22 до 37	91	95	97	103
Свыше 37 до 55	92	97	99	105
Свыше 55 до 110	96	101	104	107
Свыше 110 до 220	100	104	106	110
Свыше 220 до 400	102	106	109	112

Таблица 6.2

Номинальная мощность, кВт	Уровень звуковой мощности, дБ (по шкале А), машин исполнения IP44 с синхронными частотами вращения, об/мин			
	750	1000	1500	3000
До 1,1	68	68	68	73
Свыше 1,1 до 2,2	72	72	72	78
Свыше 2,2 до 5,5	76	76	77	84
Свыше 5,5 до 11	80	80	82	87
Свыше 11 до 22	83	83	87	90
Свыше 22 до 35	87	87	91	94
Свыше 37 до 55	90	90	94	96
Свыше 55 до 110	92	94	98	100
Свыше 110 до 220	–	100	103	103

несколько классов по уровням шума с различием в 5 дБ (по шкале А) между соседними классами.

Нормы DIN 57530 на 3–13 дБ (по шкале А) жестче, чем нормы по СТ СЭВ и МЭК, и относятся к уровням шума АД в номинальном режиме (табл. 6.2). Следует отметить, что нормы DIN соответствуют средним значениям уровней шума, определенным по результатам испытаний большого числа АД различных фирм.

Имеющееся различие в методах измерения шума в рекомендациях МЭК, стандартах и нормах в настоящее время устраняется пересмотром стандарта ISO 1680.

Шумовые характеристики серий низковольтных асинхронных двигателей. Для разработки целесообразных предельно допустимых уровней шума АД серии АИ наряду с анализом современных требований был проведен анализ уровней шума АД, изготовляемых различными странами-участницами Интерэлектро. При этом кроме сопоставления фактических уровней шума с имеющимися нормами представилось возможным определить статистические зависимости уровней шума от основных параметров АД. Возможность существования таких корреляционных зависимостей вытекает из следующих общих соображений.

Потребляемая мощность связана с электромагнитными нагрузками и главными размерами двигателя соотношением

$$P_1 = CD_{i1}^2 l_1 n, \tag{6.1}$$

где $C = kAB_g$ – коэффициент использования; D_{i1} – внутренний диаметр сердечника статора; l_1 – длина сердечника статора; n – частота вращения; A – линейная токовая нагрузка; B_g – индукция в воздушном зазоре.

Аэродинамический шум зависит, главным образом, от окружной скорости лопаток вентилятора, т.е. от n и диаметра вентилятора, который в свою очередь выбирают исходя из потерь, определяемых индукцией и линейной токовой нагрузкой.

Магнитный шум зависит от индукции и линейной токовой нагрузки, которые определяют магнитные силы, и от геометрических размеров (главным образом диаметра и высоты спинки статора), которые определяют жесткость статора.

Подшипниковый шум зависит от размеров подшипника, которые выбирают по массе ротора, пропорциональной $D_{a2}^2 l_2$, частоте вращения, индукции в воздушном зазоре.

Установление прямых аналитических зависимостей уровней шума от электромагнитных нагрузок и размеров машины затруднено, поэтому целесообразно установление статистических зависимостей.

Зависимости уровней звуковой мощности L_{wA}, дБ (по шкале А), от основных параметров выражаются уравнениями регрессии вида

$$L_{wA} = C_1 \lg x + C_2, \tag{6.2}$$

где x – тот или иной параметр.

Значения уровней звуковой мощности в зависимости от номинальной мощности АД P, внутреннего диаметра сердечника статора D_{i1}, полюсного деления τ, высоты спинки h_{j1}, окружной скорости вентилятора v получены по данным испытаний АД со степенью защиты

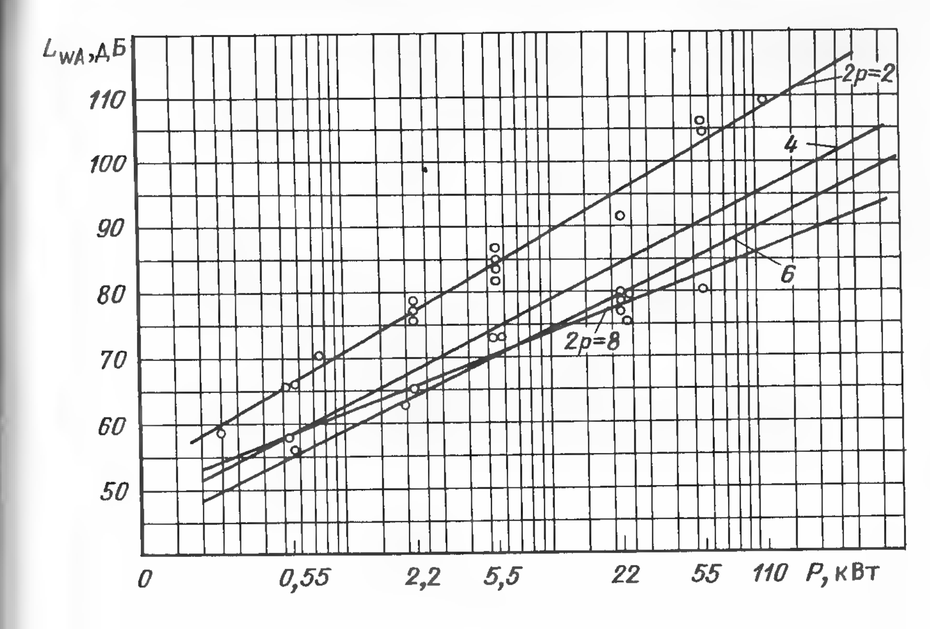


Рис. 6.1. Зависимость уровня звуковой мощности от номинальной мощности АД

IP44, изготовленных в пяти странах СЭВ, и представлены на рис. 6.1 – 6.5. Там же нанесены линии регрессии.

В табл. 6.3 представлены значения коэффициентов C_1 и C_2 уравнения (6.2), а в табл. 6.4 – коэффициенты корреляции r и отклонения σ измеряемых значений от направления регрессии с надежностью 95 %.

Из табл. 6.3, 6.4 следует, что между уровнем звуковой мощности АД и параметрами машины существуют зависимости с высокими значениями коэффициентов корреляции. Коэффициенты корреляции несколько уменьшаются с ростом числа полюсов, что можно объяснить влиянием технологии изготовления на уровни магнитных составляющих шума. Коэффициенты корреляции между уровнем шума, номинальной мощностью и внутренним диаметром сердечника для всей совокупности АД ниже, чем для АД каждой полюсности, а коэффициенты корреляции между уровнем шума и высотой спинки статора и полюсным делением для всей совокупности примерно такие же, как и для АД отдельных полюсностей. Последнее обстоятельство позволяет рассматривать зависимости уровней шума от τ и h_{j1} без учета частоты вращения. Для зависимости уровня шума от номинальной мощности и частоты вращения АД может быть принято следующее общее выражение:

$$L = (8 \lg n - 9{,}5) \lg P + 16{,}2 \lg n + 12{,}5. \tag{6.3}$$

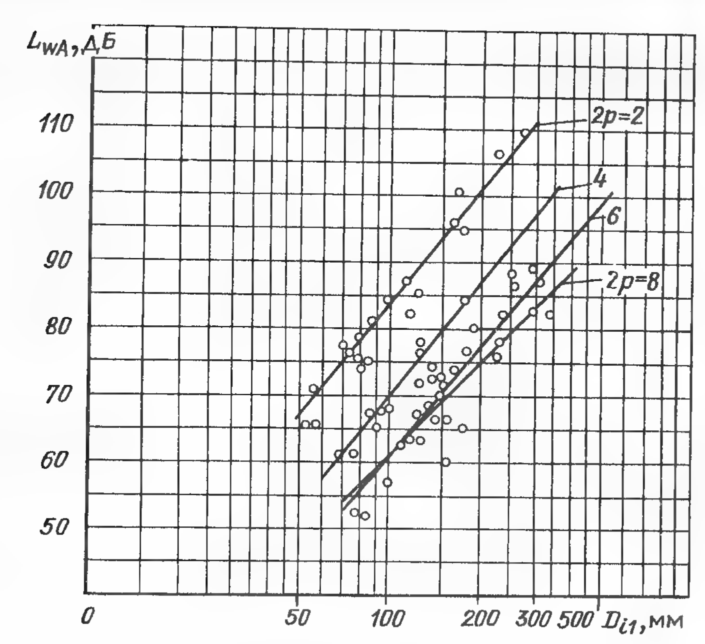


Рис. 6.2. Зависимость уровня звуковой мощности от внутреннего диаметра сердечника статора

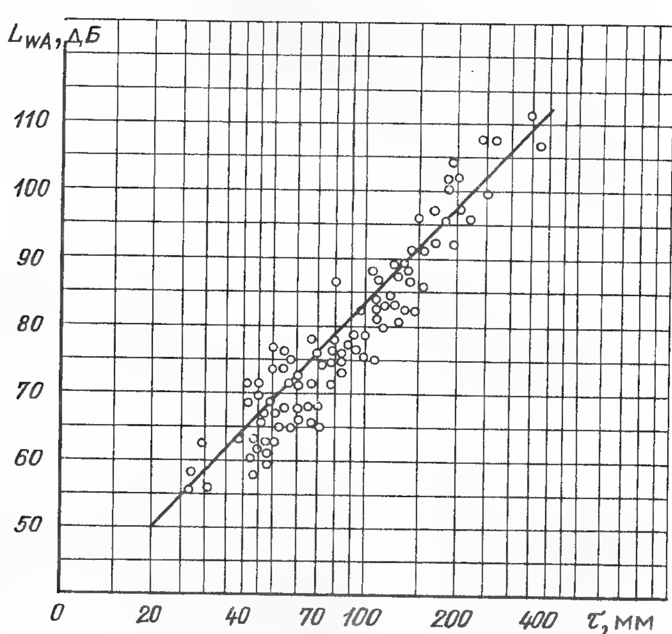


Рис. 6.3. Зависимость уровня звуковой мощности от полюсного деления

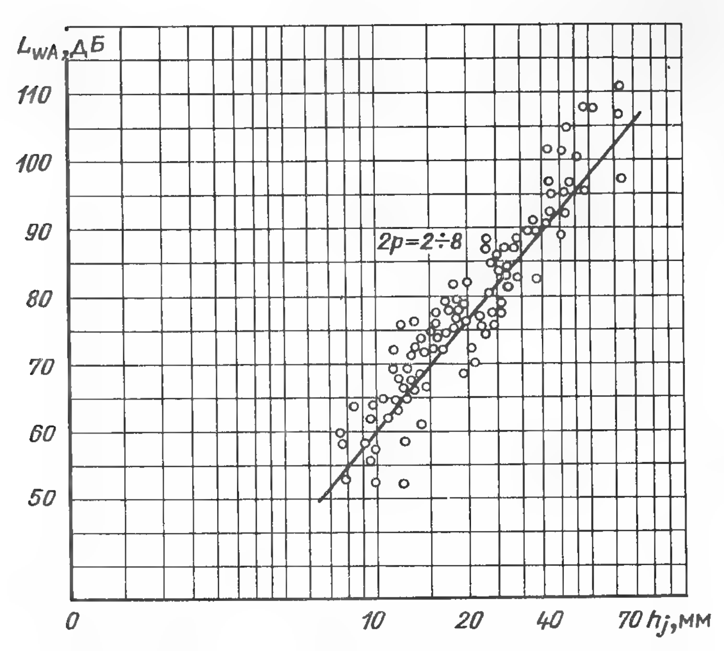


Рис. 6.4. Зависимость уровня звуковой мощности от высоты спинки статора

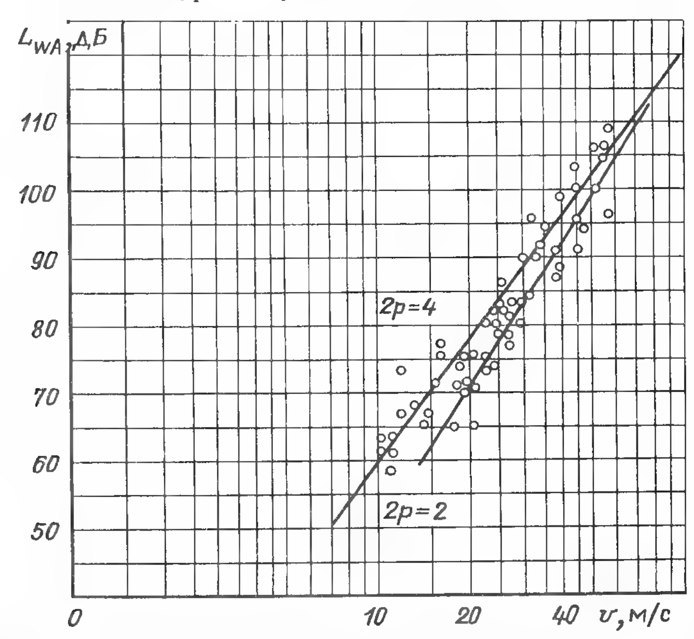


Рис. 6.5. Зависимость уровня звуковой мощности от окружной скорости вентилятора

Таблица 6.3

Параметр	Коэффициенты C_1/C_2 при числе полюсов $2p$				
	2	4	6	8	2–8
P	18,66/69,92	15,97/63,25	15,61/58,66	12,87/61,28	16,56/62,95
D_{i1}	57,65/–32,59	56,56/–43,8	52,72/–44,19	45,44/–30,00	43,45/16,89
h_{j1}	–	–	–	–	55,8/4,45
τ	–	–	–	–	48,08/–20,38
v	71,13/–32,95	56,26/–5,71	–	–	–

Таблица 6.4

Параметр	Отношение r/σ при числе полюсов $2p$				
	2	4	6	8	2–8
P	0,974/3	0,966/3,16	0,933/4,82	0,889/4,09	0,87/–
D_{i1}	0,97/3,25	0,964/3,24	0,959/3,77	0,87/4,41	0,695/–
h_{j1}	0,94/4,5	0,948/4,26	0,933/4,78	0,852/4,69	0,942/–
τ	0,968/3,35	0,966/3,13	0,965/3,48	0,84/4,85	0,947/–
v	0,958/–	0,954/–	–	–	–
$D_{i1}^2 l_1$	0,975/3,07	0,968/3,08	0,936/4,09	0,834/4,48	

Полученные зависимости (6.2) и (6.3) дают возможность оценить уровни шума АД новой серии на начальных стадиях проектирования путем сравнения основных размеров новой и существующих серий. Определенным преимуществом полученных соотношений является то, что они учитывают влияние технологических факторов на уровень шума, которое трудно либо невозможно учесть в обычных расчетах. Кроме того,

полученные зависимости позволяют оценить эффективность мероприятий по снижению уровня шума. Действительно, можно уверенно предполагать, что для серии АД, построенной по определенной концепции в части увязки установочных размеров и номинальных мощностей, критерия оптимизации, ориентации на определенную технологию, материалы и т.д., существует зависимость между уровнями шума и мощностью при данной частоте вращения. Эти уровни шума можно назвать "естественными". Машины, уровень шума которых отклоняется в ту или другую сторону от "естественных" уровней по тому или иному признаку, выпадают из рамок принятой общей концепции. Детальный анализ таких машин позволяет установить значимость того или иного признака с точки зрения шума и других показателей и целесообразность изменения концепции построения серии в части этого признака.

В настоящее время уменьшение уровней шума достигается повышением точности изготовления, уменьшением потерь вследствие применения лучших материалов, совершенствованием систем охлаждения, применением более нагревостойкой изоляции, совершенствованием конструкции отдельных узлов и т.д. Однако при ужесточении требований к шуму указанных средств может оказаться недостаточно либо они будут не экономичны. В этих случаях может потребоваться изменение определяющих признаков общей концепции – увязки шкал установочных размеров и номинальных мощностей, уровней использования материалов, критерия оптимизации.

На основе приведенного анализа были сформулированы требования к уровням шума АД серии АИ.

С одной стороны, эти требования являются более прогрессивными, чем предложения табл. 6.1, и близки к наиболее жестким требованиям табл. 6.2 современного электромашиностроения. С другой стороны, разработанные требования выполнимы, так как близки к "естественным" уровням для АД предыдущих серий. В СССР для серии АИ приняты в основном значения 3-го и 4-го классов уровня шума по СТ СЭВ.

6.2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ ВИБРАЦИЙ

Существующие национальные (DIN, CN, BS, ГОСТ) и международные (МЭК, ISO, СТ СЭВ) стандарты по методам измерения и допустимым уровням вибрации близки между собой. В качестве измеряемой и регламентируемой величины принято эффективное значение общего уровня виброскорости. Измерения проводятся на упруго установленной машине в режиме холостого хода, в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Требования к АД устанавливаются в зависимости от высоты оси вращения и (в некоторых стандартах) от частоты вращения. Устанавливаются также три категории машин по вибрации: N – нормаль-

Таблица 6.5

Номинальная частота вращения, об/мин	Максимальное эффективное значение виброскорости, мм/с, при высотах оси вращения h, мм			
	$45 \leqslant h \leqslant 56$	$56 < h \leqslant 132$	$132 < h \leqslant 225$	$h > 225$
Свыше 600 до 1800	1,12	1,8	1,8	2,8
Свыше 1800 до 3600	1,12	1,8	2,8	4,5

ные, R — с пониженной вибрацией, S — с особо жесткими требованиями по вибрации.

Для серии АИ на основе данных измерений большого количества АД различных стран и с учетом требований международных стандартов установлены достаточно прогрессивные требования по допустимым вибрациям (табл. 6.5).

6.3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНСТРУКЦИИ ДВИГАТЕЛЕЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ СНИЖЕНИЕ ШУМА И ВИБРАЦИЙ

На основании проведенных экспериментальных исследований разработаны рекомендации по конструкции АД серии АИ:

рациональный выбор соотношения числа зубцов статора и ротора, в особенности для многополюсных АД;

повышение точности механической обработки узлов и деталей;

повышение точности балансировки роторов;

установка подшипников высокого класса. Подшипники должны иметь низкий уровень шума в широком спектре частот;

рациональная конструкция вентиляторного узла (конфигурация лопаток, диаметр вентилятора, конструкция кожуха и др.), широкое использование пластмасс для изготовления вентилятора и кожуха;

полное прилегание щитов к корпусу;

обеспечение равномерного воздушного зазора, введение при необходимости механической обработки внутренней поверхности статора на базе окончательно обработанных замков.

6.4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ВИБРАЦИЙ И ШУМОВ

Анализ существующих в различных странах СЭВ методик расчета магнитных вибраций и шумов показал, что все они имеют близкую структуру и базируются на одинаковом представлении о природе возникновения магнитных вибраций и шумов. Методики отличаются друг от друга полнотой учета тех или иных факторов, влияющих на уровни шума и вибрации, и выражениями для расчета отдельных величин.

Основным принципом, определяющим структуру методики расчета магнитных вибраций и шумов, является предположение о линейности механической системы, при которой частота магнитных вибраций и шумов равна частоте вызывающих ее магнитных сил, а амплитуда деформаций вычисляется делением силы, действующей с данной частотой, на жесткость (с учетом усиления деформации при резонансах). Совокупность амплитуд вибраций на соответствующих частотах (спектр вибраций), а также общий уровень шума являются конечным результатом расчетов.

Частотный состав магнитных вибраций получен из анализа уравнения Максвелла

$$p_r(x,\ t) = \frac{1}{2\mu_0} B^2(x,\ t), \qquad (6.4)$$

где $B(x,\ t)$ — рапределение магнитной индукции в воздушном зазоре; μ_0 — магнитная постоянная; $x,\ t$ — пространственная и временная координаты.

Анализ проводят исходя из представления индукции $B(x,\ t)$ в виде произведения

$$B(x, t) = \frac{\mu_0}{\delta} F(x, t)\, \lambda_1(x)\, \lambda_2(x, t)\, \lambda_э(x, t)\, \lambda_м, \qquad (6.5)$$

где μ_0/δ — проводимость равномерного воздушного зазора δ; $F(x, t)$ — результирующая МДС; $\lambda(x,\ t)$ — относительные проводимости воздушного зазора, учитывающие зубчатость статора и ротора, эксцентриситет и насыщение магнитной цепи.

Для АД единых серий признано целесообразным:

учитывать гармоники поля, вызванные насыщением магнитной цепи, при $k_{mg} \geqslant 1{,}3$ и гармоники от эксцентриситета при $e \geqslant 0{,}3$;

вычислять вибрации от сил высоких порядков и частот только при резонансе колебаний.

Расчетные формулы для жесткостей и собственных частот статоров получены на основе соответствующих выражений для тонких симметричных однородных колец, причем влияние обмотки, зубцов статора и станины учтено введением эмпирических коэффициентов. Жесткость и собственные частоты вала при первом порядке колебаний вычисляют с учетом жесткости подшипников качения.

Расчет деформаций статора при резонансе выполняют с учетом механической несимметрии конструкций. Усредненные значения декремента затухания были получены экспериментально при испытании большого количества статоров АД.

Для разработанной методики была составлена программа на языке FORTRAN для ЭВМ ЕС-1030. Результаты расчета удовлетворительно совпадают с опытными данными при низких порядках деформации ($r \leqslant 4$). Однако для ряда случаев (многополюсные АД, силы высоких порядков) различие между расчетными и экспериментальными данными может быть значительным. Это объясняется существенным влиянием технологических факторов, учесть которые в настоящее время не представляется возможным.

Вместе с тем апробация методики показала, что она дает надежно точную сопоставимую оценку влияния на вибрацию различных конструктивных факторов (соотношений чисел пазов, скоса, зазоров, толщины ярма, корпуса и т.д.). Методику наиболее целесообразно использовать для сопоставления различных конструктивных вариантов при выборе оптимального.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 6.6.

Порядок статорных и роторных гармоник поля. Число пазов статора на полюс и фазу q можно представить в виде

$$q = c_q/d_q, \qquad (6.6)$$

где c_q и d_q – целые числа, а c_q/d_q – несократимая дробь.

При целом q $d_q = 1$, тогда $c_q = q$.

Порядок незубцовой статорной гармоники

$$\nu_1 = \frac{6}{d_q} k_1 + 1, \qquad (6.7)$$

где $k_1 = \pm 1, \pm 2, \ldots;\ |k_1| \neq c_q, 2c_q, 3c_q, \ldots;\ k_1 \leqslant 3c_q + 1$.

Предельный номер зубцовой статорной гармоники

$$k_{1m} = \frac{2f + f_m}{z_2 f} p. \qquad (6.8)$$

При расчете вибрации рекомендуется принимать $f_m = 2000$ Гц, а при расчете шума – $f_m = 8000$ Гц.

Порядок зубцовой статорной гармоники

$$\nu_z = \frac{z_1}{p} k_1 + 1,\ k_1 = \pm 1, \pm 2, \ldots, \pm k_m. \qquad (6.9)$$

Порядок зубцовой роторной гармоники, вызванной основной гармоникой поля,

$$\mu_1 = \frac{z_2}{p} k_2 + 1,\ k_2 = \pm 1, \pm 2, \ldots, k_{1m}. \qquad (6.10)$$

Таблица 6.6

Наименование	Обозначение	Единица
Номинальная мощность	P	кВт
Частота сети	f	Гц
Номинальное фазное напряжение	U	В
Номинальный фазный ток статора	I_1	А
Скольжение при номинальной нагрузке	s_n	–
Число пар полюсов основного поля	p	–
Внешний диаметр сердечника статора	D_{a1}	мм
Внутренний диаметр сердечника статора	D_{i1}	мм
Длина сердечника статора	l_1	мм
Число пазов статора	z_1	–
Зубцовое деление статора	t_1	мм
Ширина шлица паза статора	b_{c1}	мм
Высота паза статора	h_{z1}	мм
Ширина зубца статора средняя	b_{z1}	мм
Число пазов ротора	z_2	–
Зубцовое деление ротора	t_2	мм
Ширина шлица паза ротора	b_{c2}	мм
Высота спинки статора	h_{j1}	мм
Масса спинки статора	G_{j1}	кг
Масса зубцов статора	G_{z1}	кг
Расчетная масса обмотки	G_w	кг
Плотность материала сердечника статора	ρ_j	кг/мм^3
Плотность материала станины	ρ_g	кг/мм^3
Внутренний диаметр сердечника ротора	D_{i2}	мм
Толщина станины	h_g	мм
Число параллельных ветвей обмотки статора	a	–
Суммарная масса станины, сердечника статора с обмоткой и подшипниковых щитов	G_k	кг
Модуль упругости сердечника статора	E_1	МПа
Длина станины	l_g	мм
Внешний диаметр станины	D_g	мм
Модуль упругости материала станины	E_2	МПа
Масса ротора	G_a	кг
Масса машины	G	кг
Скос пазов в долях зубцового деления ротора	β_2	–
Число пазов статора на полюс и фазу	q	–
Шаг обмотки в долях зубцового деления статора	y	–
Коэффициент воздушного зазора (Картера) для статора	k_{g1}	–
Коэффициент воздушного зазора (Картера) для ротора	k_{g2}	–
Коэффициент насыщения магнитной цепи	k_{mg}	–
Индукция в зазоре	B_g	Тл
Воздушный зазор	δ	мм
Ток холостого хода	I_0	А
Приведенный ток ротора	I_2	А
Относительный эксцентриситет воздушного зазора	e	–

Таблица 6.6 (окончание)

Наименование	Обозначение	Единица
Радиальная нагрузка на подшипник	F_r	Н
Коэффициент насыщения зубцов	k_{sz}	–
Диаметр шарика подшипника	d_k	мм
Коэффициент мощности	$\cos\varphi$	–
Предельная частота, до которой рассчитывается вибрация	f_m	Гц
Критическая частота вращения ротора	$n_{кр}$	об/мин
Особенности конструкции*	ISP	–

*Для закрытых машин с алюминиевой станиной ISP = 1; для закрытых машин с чугунной или стальной станиной ISP = 2; для защищенных машин ISP = 3.

Порядок роторной гармоники, вызванной насыщением магнитной цепи,

$$\mu_s = \frac{z_2}{p} k_2 + 3, \; k_2 = \pm 1, \; \pm 2. \tag{6.11}$$

Порядок роторной гармоники, вызванной эксцентриситетом воздушного зазора,

$$\mu_e = \frac{z_2}{p} k_2 + 1 + \frac{1}{p} \quad \text{при } p = 1; \tag{6.12}$$

$$\mu_e = \frac{z_2}{p} k_2 + 1 \pm \frac{1}{p} \quad \text{при } p > 1; \tag{6.13}$$

$k_2 = \pm 1, \pm 2$.

Максимальный расчетный порядок гармоник радиальной силы $r_m = 8$ при $2p < 8$; $r_m = 2p$ при $2p \geqslant 8$.

Порядки гармоник радиальной силы определяются как наименьшие по абсолютному значению из вычисленных по формуле

$$r = |\mu \pm \nu| p. \tag{6.14}$$

Для дальнейшего расчета выбирают все случаи взаимодействия гармоник поля, создающих нулевую (если она имеется) и две другие наименьшего порядка гармоники силы (но не выше r_m). Частоты гармоник силы, Гц,

$$f_0 = f\left[\frac{z_2 k_2}{p}(1 - s_n) + 2k + 1 \pm 1\right]. \tag{6.15}$$

Знак при ± 1 в (6.15) соответствует знаку при определении порядка гармоник силы. При расчете взаимодействия статорных гармоник с роторными $k = 1$. В остальных случаях $k = 0$.

Порядок низкочастотной гармоники силы при эксцентриситете $r = 1$.

Частота низкочастотной гармоники силы при вращающемся эксцентриситете, Гц,

$$f_{0e} = f\frac{(1 - s_n)}{p}. \tag{6.16}$$

Порядок силовой волны от основной гармоники

$r = 2p$.

Частота силовой волны от основной гармоники, Гц,

$f_0 = 2f$.

Жесткости статора и корпуса (на единицу длины). Собственные частоты. Расчеты проводят для всех порядков колебаний – от нулевого до максимального r_m.

Эквивалентная толщина статора со станиной, мм,

$$h_{gj} = h_{j1} + h_g \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}\frac{l_g}{l_1}}. \tag{6.17}$$

Эквивалентный радиус статора со станиной, мм,

$$R_{1g} = (D_{i1} + 2h_{z1} + h_{gj})/2. \tag{6.18}$$

Средний радиус спинки статора, мм,

$$R_{j1} = (D_{a1} - h_{j1})/2. \tag{6.19}$$

Средний радиус станины, мм,

$$R_g = (D_{a1} + h_g)/2. \tag{6.20}$$

Жесткость статора для нулевого порядка деформаций ($r = 0$), МПа:

при ISP = 1

$$K_{a1} = E_1 h_{gj}/R_{1g}; \tag{6.21}$$

при ISP = 2

$$K_{a1} = \frac{E_1 h_{j1}}{R_{j1}} + \frac{E_2 h_g}{R_g}\frac{l_g}{l_1}; \tag{6.21a}$$

при ISP = 3

$$K_{a1} = E_1 h_{j1}/R_{j1}. \qquad (6.21б)$$

Жесткость статора для второго порядка деформаций ($r = 2$), МПа:
при ISP = 1; 2

$$K_{a1} = E_1 h_{gj}^3/(12R_{1g}^3); \qquad (6.22)$$

при ISP = 3

$$K_{a1} = E_1 h_{j1}^3/(12R_{j1}^3). \qquad (6.22а)$$

Жесткость статора для порядков деформаций выше второго ($r > 2$), МПа:
при ISP = 1

$$K_{a1} = E_1 h_{gj}^3/(12R_{1g}^3); \qquad (6.23)$$

при ISP = 2

$$K_{a1} = \frac{E_1 h_{j1}^3}{12R_{j1}^3} + \frac{E_2 h_g^3}{12R_g^3}\,\frac{l_g}{l_1}; \qquad (6.23а)$$

при ISP = 3

$$K_{a1} = E_1 h_{j1}^3/(12R_{j1}^3). \qquad (6.23б)$$

Жесткость вала, если $n_{кр}$ не определена, Н/мм,

$$K_w = 0{,}6 \cdot 10^5 l_1 (D_{i2}/l_1)^4, \qquad (6.24)$$

если $n_{кр}$ задана,

$$K_w = \frac{4\pi^2 n_{кр}^2}{3600} G_a. \qquad (6.24а)$$

Радиальная жесткость опоры с шарикоподшипником, Н/мм,

$$K_k = 0{,}448 \cdot 10^4 F_r^{1/3} d_k^{1/3}. \qquad (6.25)$$

Жесткость ротора при первом порядке деформации ($r = 1$), Н/мм,

$$K_h = 2K_w K_k/(K_w + 2K_k). \qquad (6.26)$$

Приведенная плотность сердечника статора с обмоткой, кг/мм^2,

$$\rho_a = \frac{G_j + G_{z1} + G_w}{G_j}\,\rho_j h_{j1}. \qquad (6.27)$$

Приведенная плотность станины, кг/мм^2,

$$\rho_{g1} = \rho_g h_g. \qquad (6.28)$$

Собственная частота статора при $r = 0$, Гц:
при ISP = 1

$$f_r = \frac{8{,}1 \cdot 10^5}{R_{1g}\sqrt{(G_j + G_{z1} + G_w)/G_j}}; \qquad (6.29)$$

при ISP = 2

$$f_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_{a1} \cdot 10^3}{\rho_a R_{j1} + \rho_{g1} R_g}}; \qquad (6.29а)$$

при ISP = 3

$$f_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_{a1} \cdot 10^3}{\rho_a R_{j1}}}. \qquad (6.29б)$$

Собственная частота статора при $r = 2$, Гц:
при ISP = 1; 2

$$f_r = \frac{6{,}25 \cdot 10^5 h_{gj}}{R_{1g}^2\sqrt{(G_j + G_{z1} + G_w)/G_j}}; \qquad (6.30)$$

при ISP = 3

$$f_r = \frac{6{,}25 \cdot 10^5 h_{j1}}{R_{j1}^2\sqrt{(G_j + G_{z1} + G_w)/G_j}}. \qquad (6.30а)$$

Собственная частота статора при $r > 2$, Гц:
при ISP = 1

$$f_r = \frac{2{,}34 \cdot 10^5 h_{gj}}{R_{1g}^2\sqrt{(G_j + G_{z1} + G_w)/G_j}}\;\frac{r(r^2 - 1)}{\sqrt{r^2 + 1}}; \qquad (6.31)$$

при ISP = 2

$$f_r = \frac{r(r^2-1)}{\sqrt{r^2+1}} \cdot \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{a1} \cdot 10^3}{\rho_a R_{j1} + \rho_{g1} R_g}}\,; \tag{6.31а}$$

при ISP = 3

$$f_r = \frac{r(r^2-1)}{\sqrt{r^2+1}} \cdot \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{a1} \cdot 10^3}{\rho_a R_{j1}}}\,. \tag{6.31б}$$

Собственная частота ротора при $r = 1$, Гц:

$$f_r = 5\sqrt{\frac{GK_h}{G_a(G-G_a)}}\,. \tag{6.32}$$

Отбор взаимодействующих гармоник поля. Отбор гармоник поля для дальнейшего расчета проводится в следующем порядке. Сравнивают частоты гармоник силы с собственными частотами АД на наличие резонанса колебаний, который наступает, если $0{,}8 \leqslant |f_0/f_r| \leqslant 1{,}3$. При этом каждую из частот гармоник силы, кроме f_0 при $r = 1$, сравнивают с частотой собственных колебаний любого порядка, за исключением первого. При наличии гармоник силы первого порядка их частоты сравнивают только с собственными частотами первого порядка.

Для дальнейших расчетов оставляют взаимодействия гармоник поля, дающие следующие порядки гармоник силы:

нулевой порядок – только при возникновении резонанса колебаний;

минимальный порядок – независимо от резонанса;

порядок, следующий за минимальным, – при резонансе, а при учете эксцентриситета – независимо от резонанса.

При резонансе, если порядок собственной частоты не соответствует порядку деформации, обозначим последний как r_r. При резонансе фиксируют собственную частоту порядка r_r. При его отсутствии собственная частота – того же порядка, что и частота гармоники силы.

Амплитуды гармоник поля. Расчету амплитуды гармоник поля предшествует расчет обмоточного коэффициента.

Обмоточный коэффициент при q, равном целому числу,

$$k_{w\nu} = \frac{\sin\left(\nu\,\frac{\pi}{6}\right)}{c_q \sin\left(\nu\,\frac{\pi}{6c_q}\right)} \sin\left(\frac{y_1 p}{z_1}\,\nu\pi\right). \tag{6.33}$$

При q дробном и d_q четном

$$k_{w\nu} = \frac{\cos\left(\nu\,\frac{\pi}{6}\,d_q y_i\right)}{c_q \cos\left(\nu\,\frac{\pi}{6c_q}\,d_q y_i\right)} \sin\left(\frac{y_1 p}{z_1}\cdot\nu\pi\right), \tag{6.34}$$

где

$$y_i = (1 + 3c_q g)/d_q\,. \tag{6.35}$$

При дробном q и нечетном d_q

$$k_{w\nu} = \frac{\sin\left(\nu\,\frac{\pi}{6}\,d_q y_i\right)}{c_q \sin\,\nu\left(\frac{\pi}{6c_q} d_q y_i\right)} \sin\left(\frac{y_1 p}{z_1}\,\nu\pi\right), \tag{6.36}$$

где

$$y_i = (1 + 6c_q g)/d_q\,. \tag{6.37}$$

В (6.35), (6.37) g – любое целое число, при котором y_i – целое число.

Коэффициент скоса:

для расчета изгибных колебаний

$$\left.\begin{aligned} k_\chi &= \frac{\sin\left(|\mu|\frac{p\pi}{z_2}\beta_2\right)}{|\mu|\frac{p\pi}{z_2}\beta_2} \quad \text{при } \beta_2 \neq 0; \\ k_\chi &= 1 \quad \text{при } \beta_2 = 0; \end{aligned}\right\} \tag{6.38}$$

для расчета крутильных колебаний

$$\left.\begin{aligned} k_{\chi\tau} &= \frac{\cos\left(|\mu|\,\frac{p\pi}{z_2}\beta_2\right) - k_\chi}{|\mu|\,\frac{p\pi}{z_2}\beta_2} \quad \text{при } \beta_2 \neq 0; \\ k_{\chi\tau} &= 0 \quad \text{при } \beta_2 = 0. \end{aligned}\right\} \tag{6.39}$$

Коэффициент удельной проводимости воздушного зазора, обуслов-

ленной зубчатостью статора,

$$\lambda_a = \lambda_{i1} \lambda_{t1}, \tag{6.40}$$

где

$$\lambda_{i1} = \frac{1 + k_{\lambda 1}^2 - 2k_{\lambda 1}}{2(1 + k_{\lambda 1}^2)}; \quad k_{\lambda 1} = \frac{b_{c1}}{2\delta} + \sqrt{1 + \left(\frac{b_{c1}}{2\delta}\right)^2};$$

$$\lambda_{t1} = \frac{1}{|k_1|} \frac{4}{\pi} \left[\frac{1}{2 - 5{,}14\left(|k_1| \frac{b_{c1}}{t_1}\right)^2} \right] \sin\left(1{,}6\pi |k_1| \frac{b_{c1}}{t_1}\right),$$

то же, обусловленный зубчатостью ротора,

$$\lambda_2 = \lambda_{i2} \lambda_{t2}, \tag{6.41}$$

где

$$\lambda_{i2} = \frac{1 + k_{\lambda 2}^2 - 2k_{\lambda 2}}{2(1 + k_{\lambda 2}^2)}; \quad k_{\lambda 2} = \frac{b_{c2}}{2\delta} + \sqrt{1 + \left(\frac{b_{c2}}{2\delta}\right)^2};$$

$$\lambda_{t2} = \frac{1}{|k_2|} \frac{4}{\pi} \left[\frac{1}{2 - 5{,}14\left(|k_2| \frac{b_{c2}}{t_2}\right)^2} \right] \sin\left(1{,}6\pi |k_2| \frac{b_{c2}}{t_2}\right).$$

Амплитуда незубцовой гармоники поля статора, Тл,

$$B_\nu = \frac{1}{\nu} \frac{k_{w\nu}}{k_{w1}} k_{mg} \frac{I_1}{I_0} B_g, \tag{6.42}$$

где $k_{w1} = k_{w\nu}$ при $\nu = 1$.

Амплитуда зубцовой гармоники поля статора, Тл,

$$B_{\nu z} = B_g \sqrt{B_{1w}^2 - 2B_{1w} B_{1z} \sin\varphi + B_{1z}^2}, \tag{6.43}$$

где

$$B_{1w} = \frac{1}{\nu} \frac{k_{w\nu}}{k_{w1}} k_{mg} \frac{I_1}{I_0}; \quad B_{1z} = \frac{k_{g1} \lambda_a}{2} (-1)^{k_1\left(\frac{z_1}{2p} - y_1 + 1\right)}.$$

Амплитуда зубцовой гармоники поля ротора, Тл,

$$B_\mu = B_g \sqrt{B_{2w}^2 + B_{2z}^2}, \tag{6.44}$$

где

$$B_{2w} = \frac{1}{\mu} k_{mg} \frac{I_2}{I_0}; \quad B_{2z} = \frac{k_{g2} \lambda_2}{2}.$$

Для расчета B_{2w} при закрытых пазах ротора и режиме холостого хода принять $I_2 = I_0$.

Амплитуда роторной гармоники поля, вызванной насыщением зубцов, Тл,

$$B_{\mu s} = \frac{3}{\mu_s} B_g \frac{1 - k_{sz}}{3k_{sz}} \frac{I_2}{I_0}. \tag{6.45}$$

В режиме холостого хода, Тл,

$$B_{\mu s} = \frac{\lambda_2 k_{g2}}{2} \frac{1 - k_{sz}}{3k_{sz}} B_g. \tag{6.46}$$

Амплитуда роторной гармоники поля, вызванной эксцентриситетом, Тл,

$$B_{\mu e} = B_\mu \frac{e}{2}. \tag{6.47}$$

Амплитуды деформаций. Виброскорость. Коэффициент динамичности при отсутствии резонанса

$$k_d = \frac{1}{1 - (f_0/f_r)^2}, \tag{6.48}$$

где f_r – собственная частота порядка r.

Коэффициент динамичности в области резонанса

$$k_d = \frac{1}{\sqrt{[1 - (f_0/f_{rr})^2]^2 + (2\Delta f_0/f_{rr})^2}}, \quad 2\Delta \approx 0{,}1 \tag{6.49}$$

где f_{rr} – собственная частота порядка r_r.

Амплитуда деформации статора от основной гармоники поля, мм,

$$A_r = B_g^2 \cdot 10^{-1} \frac{D_{i1}}{(4p^2 - 1)^2 K_{a1}}. \tag{6.50}$$

Таблица 6.7

r_r	k_{rp} для порядков деформаций r									
	0	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1	10	5	1	0,5	0,35	0,2	0,1	0,03	0,01
2	0,001	1	0,13	0,08	0,063	0,059	0,051	0,049	0,046	0,045
3	0,02	0,71	1	0,23	0,22	0,215	0,215	0,21	0,2	0,19
4	0,1	0	0,35	1	0,316	0,37	0,395	0,46	0,46	0,47
5	0,5	0	0	0,25	1	0,38	0,5	0,58	0,71	0,8
6	1	0	0	0	0,21	1	0,42	0,62	0,75	0,85
7	5	0	0	0	0	0,19	1	0,46	0,71	0,9
8	9	0	0	0	0	0	0,17	1	0,48	0,75

Амплитуда деформации от высших гармоник, мм:
при отсутствии резонанса или резонансе при $r = r_r$

$$A_r = \left| 2B_\nu B_\mu k_\chi \frac{D_{i1} \cdot 10^{-1}}{(r^2 - 1)^2} \frac{k_d}{K_{a1}} \right| ; \tag{6.51}$$

при наличии резонанса и $r > r_r$

$$A_r = \left| 2B_\mu B_\nu \frac{D_{i1} \cdot 10^{-1}}{(r_r^2 - 1)^2} k_\chi \frac{k_d}{K_{a1}} k_{rp} \right| ; \tag{6.52}$$

то же, но при $r < r_r$

$$A_r = 2B_\mu B_\nu D_{i1} \cdot 10^{-1} k_\chi \times$$

$$\times \sqrt{\left[\frac{k_d k_{rp}}{K_{a1}(r_r^2 - 1)^2}\right]^2 + \left[\frac{k_d}{K_{a1}(r^2 - 1)^2}\right]^2} , \tag{6.53}$$

где k_{rp} принимают по табл. 6.7.

В первом слагаемом подкоренного выражения (6.53) k_d, K_{a1} соответствуют порядку r_r, во втором порядку r гармоники силы.

Амплитуда деформации при $r = 1$ или $r_r = 1$, мм,

$$A_r = 13D_{i1} l_1 B_\mu B_\nu k_\chi \frac{k_d}{K_h} \frac{G_a}{G} 10^{-1} . \tag{6.54}$$

Амплитуда крутильных колебаний, мм,

$$A_\tau = \sqrt{3} \frac{4B_\nu B_\mu R_{j1}^2}{E_1 h_{j1}(1 + k_\tau)} k_{\chi\tau} 10^{-1} , \tag{6.55}$$

где $k_\tau = 1{,}4(h_{gj}/l_1)^2 r^2$.

Суммарная амплитуда деформаций от высших гармоник на частоте f_0, мм,

$$A = \sqrt{A_r^2 + A_\tau^2}. \tag{6.56}$$

Амплитуда деформаций от низкочастотной гармоники силы при эксцентриситете воздушного зазора, мм,

$$A_r = D_{i1} l_1 \frac{k_e}{K_h} \frac{G_a}{G} 10^{-1} . \tag{6.57}$$

Коэффициент k_e зависит от числа параллельных ветвей a обмотки статора; его значения приведены ниже:

a	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
k_e	1	1	0,74	0,5	0,35	0,25	0,19	0,15	0,11	0,09	0,07

Эффективное значение составляющих виброскорости, мм/с,

$$v_i = 4{,}45 f_0 A . \tag{6.58}$$

Общий уровень виброскорости магнитных вибраций, мм/с,

$$v_m = \sqrt{\sum_i v_i^2}. \tag{6.59}$$

Уровни шума. Уровень звукового давления составляющей спектра магнитного шума на расстоянии 1 м от контура машины, дБ,

$$L_1 = 20\lg\left(\frac{D_g}{2} |f_0| A\right) \quad L_{p2} - L_{p3} - 20\lg(l_1 \cdot 10^{-3} + 1) + 68, \tag{6.60}$$

где L_{p2} определяют по табл. 6.8 в зависимости от $\gamma = \mathrm{arctg}\,\frac{D_g}{l_g}$, а L_{p3} – по табл. 6.9 в зависимости от $k_L = 0{,}91 \cdot 10^{-5} |f_0| D_g$.

Таблица 6.8

γ, град	L_{p2}, дБ, при порядках деформаций r										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
40	9,32	7,73	6,93	6,43	6,09	5,84	5,65	5,51	5,40	5,32	5,25
45	8,34	6,80	6,05	5,59	5,28	5,07	4,92	4,81	4,74	4,69	4,66
50	7,48	5,99	5,28	4,87	4,61	4,44	4,33	4,26	4,22	4,20	4,20
55	6,71	5,28	4,62	4,26	4,04	3,91	3,84	3,81	3,80	3,82	3,85
60	6,02	4,64	4,05	3,73	3,56	3,48	3,45	3,45	3,48	3,53	3,59
65	5,40	4,08	3,54	3,28	3,16	3,12	3,13	3,17	3,23	3,31	3,39
70	4,83	3,59	3,11	2,90	2,83	2,83	2,88	2,95	3,04	3,14	3,25
75	4,31	3,14	2,73	2,58	2,55	2,60	2,68	2,78	2,90	3,03	3,15
80	3,84	2,74	2,40	2,30	2,33	2,41	2,53	2,66	2,80	2,94	3,08
85	3,41	2,39	2,11	2,07	2,14	2,26	2,41	2,57	2,73	2,88	3,04
90	3,01	2,08	1,86	1,88	1,99	2,15	2,32	2,50	2,67	2,85	3,01
100	2,31	1,56	1,48	1,59	1,78	2,00	2,21	2,42	2,62	2,80	2,90
110	1,73	1,15	1,20	1,41	1,66	1,92	2,16	2,39	2,60	2,79	2,97
120	1,25	0,85	1,02	1,30	1,60	1,88	2,14	2,37	2,59	2,79	2,97
130	0,85	0,64	0,90	1,24	1,57	1,86	2,13	2,37	2,59	2,79	2,97
140	0,54	0,49	0,84	1,21	1,55	1,86	2,13	2,37	2,59	2,79	2,97
150	0,30	0,40	0,81	1,20	1,55	1,86	2,13	2,37	2,59	2,79	2,97
160	0,13	0,36	0,79	1,20	1,55	1,86	2,13	2,37	2,59	2,79	2,97

Таблица 6.9

k_L	L_{p3}, дБ, при порядках деформаций r										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,5	6,99	18,33	37,26	59,75	84,60	111,28	139,45	168,90	170	200	200
1	3,01	6,99	19,49	35,98	54,77	75,39	97,52	120,93	145,45	170,25	170
1,5	1,60	2,53	9,54	22,37	37,62	54,66	73,22	93,07	114,03	135,99	158,83
2	0,97	0,97	3,67	13,01	25,73	40,23	56,22	73,52	91,94	111,36	131,67
2,5	0,64	0	0,94	6,30	20,96	29,29	43,29	58,58	75,01	92,44	110,78
3	0	0	0	2,04	9,75	20,61	32,97	46,6	61,39	77,17	93,88
3,5	0	0	0	0,03	4,42	13,50	24,48	36,71	50,07	64,46	79,76
4	0	0	0	–0,63	1,01	7,67	17,34	28,36	40,49	53,64	67,72
4,5	0	0	0	–0,76	–0,59	3,16	11,27	21,21	32,34	44,29	57,28
5	0	0	0	–0,72	–1,09	0,28	6,18	15,01	25,08	36,13	48,12
5,5	0	0	0	–0,65	–1,14	–1,06	2,23	9,62	18,78	28,95	40,03
6	0	0	0	0	–1,06	–1,45	–0,28	5,04	13,22	22,57	32,82
6,5	0	0	0	0	–0,94	–1,46	–1,43	1,50	8,31	16,88	26,37
7	0	0	0	0	–0,83	–1,34	–1,75	–0,72	4,13	11,78	20,57
7,5	0	0	0	0	–0,72	–1,19	–1,72	–1,73	0,92	7,25	15,33
8	0	0	0	0	–0,64	–1,06	–1,58	–2,00	–1,09	3,39	10,60
8,5	0	0	0	0	–0,57	–0,93	–1,42	–1,96	–1,99	0,43	6,37

Таблица 6.9 (окончание)

k_L	L_{p3}, дБ, при порядках деформаций r										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9	0	0	0	0	0	–0,83	–1,26	–1,80	–2,22	–1,40	2,76
9,5	0	0	0	0	0	–0,74	–1,13	–1,62	–2,16	–2,22	0,02
10	0	0	0	0	0	–0,66	–1,01	–1,45	–1,99	–2,42	–1,66
11	0	0	0	0	0	0	–0,82	–1,17	–1,62	–2,17	–2,59
12	0	0	0	0	0	0	–0,67	–0,96	–1,32	–1,78	–2,32
14	0	0	0	0	0	0	0	–0,68	–0,92	–1,22	–1,60
16	0	0	0	0	0	0	0	0	–0,68	–0,89	–1,14
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–0,53	–0,67

Уровень звукового давления составляющей спектра, корректированный с учетом частотной характеристики шумомера Δ, дБ (по шкале А),

$$L_i = L_1 - \Delta,$$

где Δ определяют в зависимости от частоты f_0 по таблице, приведенной ниже:

f_0, Гц	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	600	800
Δ, дБ	–26,2	–22,5	–19,1	–16,1	–13,4	–10,9	–8,6	–6,6	–4,8	–3,2	–1,9	–0,8

f_0, Гц	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10 000
Δ, дБ	0	0,6	1,0	1,2	1,3	1,2	1,0	0,5	–0,1	–1,1	–1,5

Корректированный общий уровень звука магнитного происхождения, дБ (по шкале А),

$$L_{1d} = 10\lg \sum_{i=1}^{n} 10^{0;1L_i}, \qquad (6.61)$$

где n – число составляющих шума от высших гармоник поля.

6.5. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ШУМА

Методика расчета вентиляционного шума обеспечивает хорошую сходимость с экспериментальными данными для вентиляторных узлов, имеющих следующие параметры:

Окружная скорость вентилятора, мм/с	От 15 до 100
Максимальный внешний диаметр вентилятора, мм	До 500
Отношение ширины лопатки вентилятора к его диаметру	0,1–0,35
Углы наклона лопаток вентилятора, град:	
на выходе β_2	50–160
на входе β_1	90–160
Конфигурация наружной кромки лопатки	Любая

Расстояние от наружной кромки лопатки вентилятора до любого неподвижного препятствия (в том числе кожуха) в направлении движения основного потока воздуха не должно быть меньше 10% внешнего диаметра вентилятора. Число лопаток z вентилятора не должно сильно отличаться от значения, определенного по формуле

$$z_{\text{расч}} = 2\pi D_{af}/(D_{af} - D_{fi}), \tag{6.62}$$

где

$$D_{fi} = (D'_{fi} + D''_{fi})/2. \tag{6.63}$$

Если не соблюдается условие $|z - z_{\text{расч}}| \leqslant 3$, то расчет будет ориентировочным.

Условные обозначения, определяющие конструкцию лопаток вентилятора, приведены в табл. 6.10.

Исходные данные приведены в табл. 6.11.

При IW = 1 D'_{fi} равен диаметру отверстия в кожухе вентилятора.

Относительная подача вентилятора рассчитывается по формуле

$$Q_{f_0} = Q_f/Q_{fm}, \tag{6.64}$$

где Q_f – фактическая подача вентилятора; Q_{fm} – максимальная подача (в режим короткого замыкания).

При отсутствии данных принимаем $Q_{f_0} = 0{,}5$. При отсутствии данных аэродинамического расчета α_f принимается: при $\beta_1 = 90°$ $\alpha_f = 90°$; при $\beta_1 > 90°$ $\alpha_f = 0°$.

Общий уровень вентиляционного шума L_f, дБ, при IW = 3 определяется как сумма (энергетическая) двух уровней L_{f_1} и L_{f_2}, рассчитанных соответственно для конструкций IW = 1 и IW = 2:

$$L_f = 10\lg(A + B), \tag{6.65}$$

где $A = 10^{0,1L_{f_1}}$; $B = 10^{0,1L_{f_2}}$;

$$L_{f_1} = 60\lg\frac{\pi D_{af} n_n}{6\cdot 10^4} + 10\lg\frac{D_{af} l_{bf}}{10^6} +$$

Таблица 6.10

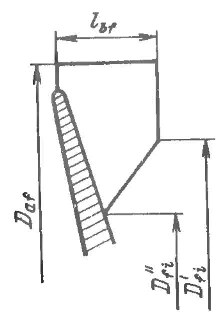
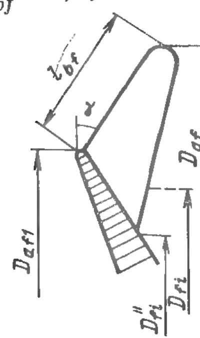
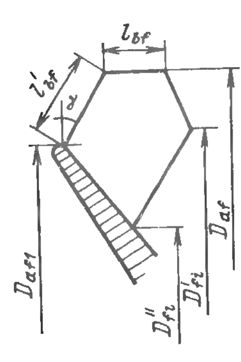
Особенности конструкции лопаток вентилятора	Признак	Значение признака
 $l_{bf} \neq 0;\ \gamma = 0$	IW	1
 $l_{bf} = 0;\ \gamma \neq 0$	IW	2
 $l_{bf} \neq 0;\ \gamma \neq 0$	IW	3

Таблица 6.10 (окончание)

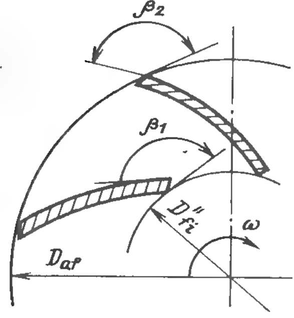
Особенности конструкции лопаток вентилятора	Признак	Значение признака
		
$\beta_1 > 90°$	–	–
$\beta_1 = 90°$	–	–

Таблица 6.11

Наименование	Обозначение	Единица
Число лопаток вентилятора	z	–
Максимальный внешний диаметр	D_{af}	мм
Минимальный внешний диаметр	D_{af1}	мм
Максимальный диаметр вентилятора на входе	D'_{fi}	мм
Минимальный диаметр вентилятора на входе	D''_{fi}	мм
Ширина лопатки на выходе воздуха из вентилятора	l_{bf}, l'_{bf}	мм
Относительная подача вентилятора	Q_{f0}	–
Угол атаки при входе воздуха на лопатки вентилятора	α_f	град
Угол наклона лопатки вентилятора на выходе воздуха	β_2	град
Частота вращения	n_n	об/мин
Допустимый уровень вентиляционного шума	$L_{доп}$	дБ

$$+ 14 + k_2 - 24{,}7\frac{D_{af}}{10^3} + k_4 + k_5 - k_6; \quad (6.66)$$

$$L_{f2} = 60\lg\frac{\pi D_{af} n_n}{6\cdot 10^4} + 10\lg\frac{D_{af} l'_{bf}}{10^6} + 14 + k_2 -$$

$$- 24{,}7\sqrt{\frac{1}{2\cdot 10^6}(D^2_{af} + D^2_{af1})} + k_4 + k_5 - k_6 - 14\left(1 - \frac{D_{af1}}{D_{af}}\right). \quad (6.67)$$

Для конструкции при IW = 1 $B = 0$ (L_{f2} не определяется), при IW = 2 $A = 0$ (L_{f1} не определяется). Значения коэффициентов k_2, k_4, k_5 принимают по таблицам, которые приведены ниже:

Q_{f0}	До 0,1	Свыше 0,1 до 0,25	Свыше 0,25 до 0,37	Свыше 0,37 до 0,5	Свыше 0,5 до 0,62	Свыше 0,62 до 0,7	Свыше 0,7 до 0,75
k_2, дБ	0	1	2	3	4	5	6

α_f, град	90–50	Менее 50, но более 0	Менее 0, но более –10	Менее –10, но более –20	Менее –20, но более –25	Менее –25, но более –30	Менее –30, но более –40
k_4, дБ	1	0	1	2	3	4	5

β_2, град	Свыше 50 до 65	Свыше 65 до 70	Свыше 70 до 75	Свыше 75 до 80	Свыше 80 до 85	Свыше 85 до 95
k_5, дБ	5	4	3	2	1	0

β_2, град	Свыше 95 до 100	Свыше 100 до 105	Свыше 105 до 110	Свыше 110 до 115	Свыше 115 до 120	Свыше 120 до 160
k_5, дБ	–1	–2	–3	–4	–5	–6

Коэффициент k_6 выбирают в зависимости от исполнения АД: при IP44 $k_6 = 4$, при IP23 и встроенном вентиляторе $k_6 = 8$.

Уровни звука в октавных полосах на расстоянии 1 м в свободном звуковом поле, дБ,

$$L_{fi} = L_f - \Delta L_i, \quad (6.68)$$

значения ΔL_i приведены ниже:

f_i, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ΔL_i, дБ	9	11	7	3	1	7	9	11

либо

$$L_{fi} = L_f + \Delta L, \tag{6.69}$$

где

$$\Delta L = A + B\lg sh + C\lg^2 sh + D\lg^3 sh; \quad sh = f\,\frac{\sqrt{D_{af} l_{bf}}}{u_2};$$

f – средняя частота в октавной полосе; u_2 – окружная скорость по наружной кромке вентилятора, м/с.

Значения A, B, C, D указаны в приводимой ниже таблице:

z	A	B	C	D
3	–10,63	–18,76	–12,13	–1,46
6	–12,40	–23,45	–17,35	0,58
12	–13,53	–27,90	–21,10	1,34

6.6. МЕТОДИКА РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКИХ ВИБРАЦИЙ

Методика расчета механических вибраций АД разработана только в СССР. Методика позволяет рассчитывать механические вибрации, причиной которых являются остаточный дисбаланс при статической и динамической балансировках ротора и наличие подшипников качения. Расчет вибраций выполняется для жестких роторов, к которым относят роторы АД единых серий.

Расчет вибрации от подшипников качения составлен в предположении, что на низких частотах (до 3-кратной частоты вращения) причиной вибраций является несовершенство изготовления подшипника по главным размерам, а также неточность монтажа. Исходные данные для определения этой вибрации выбирают из нормативных документов на точность изготовления подшипников и из чертежей машины. Расчет вибраций от подшипников на частотах выше 3-кратной частоты вращения базируется на предположении, что причиной этих вибраций является несовершенство микрогеометрии подшипников, причем уровни вибраций максимальны на частотах собственных колебаний ротора.

Так как данные по микрогеометрии подшипников получить весьма сложно, то в качестве исходного фактора возбуждения приняты уровни вибраций свободных подшипников (типовые спектры), полученные на основе статистической оценки большого количества подшипников различных классов точности и шумности, изготавливаемых в СССР. Коэффициенты усиления вибраций на резонансных частотах с учетом демпфирования приняты на основе сравнительных испытаний свободных подшипников и АД с соответствующими подшипниками.

Окончательный вариант методики был апробирован в СССР и ЧССР. В результате была установлена сходимость расчетных и экспериментальных данных. Вместе с тем при рассмотрении и согласовании методики было отмечено, что подшипниковые вибрации имеют существенный технологический разброс, определяемый как качеством самих подшипников, так и конструкцией и технологией изготовления двигателей. В связи с этим признано целесообразным использовать методику расчета механических вибраций для ориентировочных поверочных расчетов.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 6.12.

Радиальная составляющая виброскорости на частоте вращения при статической форме неуравновешенности, мм/с,

$$v_{1s} = 4{,}45 \cdot 10^{-3} f_1 l G_a / G. \tag{6.70}$$

Радиальная составляющая виброскорости на частоте вращения при динамической форме неуравновешенности, мм/с:

при чугунных станинах

$$v_{1d} = v_{1s}\,\frac{3}{1 + (D_g/l_2)^2}\,\frac{l_2}{l_{k1}}; \tag{6.71}$$

при алюминиевых станинах

$$v_{1d} = v_{1s}\,\frac{4{,}5}{1 + 1{,}5\,(D_g/l_2)^2}\,\frac{l_2}{l_k}. \tag{6.72}$$

Радиальные составляющие виброскорости на частоте вращения от перемещения цапф в опорах, мм/с,

$$v_{k1} = 4{,}45 \cdot 10^{-3} f_1 a_1 G_a/G; \tag{6.73}$$

$$v_{k2} = v_{k1} (l_2/l_k)^2, \tag{6.74}$$

где

$$a_1 = 0{,}163\sqrt{\frac{\delta_e}{d_k}}\,\frac{\sqrt{\Delta t^2 + \Delta_i^2}}{2}.$$

Таблица 6.12

Наименование	Обозначение	Единица
Масса ротора	G_a	кг
Масса машины	G	кг
Частота вращения	f_1	Гц
Расстояние между опорами (подшипниками)	l_k	мм
Диаметр шейки (цапфы) вала	d_w	мм
Радиальное биение цапфы	Δ_r	мкм
Овальность цапфы	Δ_0	мкм
Торцовое биение упорных заплечиков	Δ_t	мкм
Допустимое биение конца вала	Δ_w	мкм
Торцовое биение замков станины	Δ_k	мкм
Торцовое биение упорных поверхностей щитов (фланцев) гнезда подшипника	Δ_d	мкм
Внешний диаметр подшипника	D_e	мм
Диаметр шарика подшипника	d_k	мм
Число шариков	z_k	–
Радиальный зазор в подшипнике	δ_e	мкм
Осевое биение дорожки качения внешнего кольца	Δ_j	мкм
Осевое биение дорожки качения внутреннего кольца	Δ_i	мкм
Радиальное биение дорожки качения внутреннего кольца	Δ_{ri}	мкм
Длина сердечника ротора	l_2	мм
Удельная остаточная неуравновешенность	l	мкм
Наружный диаметр станины	D_g	мм
Виброскорость на внешнем кольце свободного подшипника при вращении испытательного шпинделя с частотой 25 об/с	v_{k25}	мм/с

Радиальная виброскорость на частоте вращения (наиболее вероятное значение), мм/с,

$$v_{1r} = \sqrt{\left(\frac{v_{1d}+v_{1s}}{2}\right)^2 + \left(\frac{v_{k1}+v_{k2}}{2}\right)^2}. \qquad (6.75)$$

Радиальная виброскорость на частоте вращения (наибольшее значение), мм/с.

$$v_{1rm} = v_{k1} + (\text{большая из величин } v_{1s} \text{ и } v_{1d}). \qquad (6.76)$$

Для нахождения осевой виброскорости на частоте вращения предварительно определяем

$$\Delta_{tm} = 0{,}3\sqrt{\Delta_i^2 + \Delta_t^2 + (\Delta_w D_{ep}/l_k)^2}; \qquad (6.77)$$

$$\Delta_{ti} = 0{,}3\sqrt{\Delta_j^2 + \Delta_d^2 + (\Delta_k D_{ep}/D_g)^2}; \qquad (6.78)$$

$$D_{ep} = \frac{1}{2}(d_w + D_e);$$

если $\Delta_{tm} > \Delta_{ti}$, то $a_2 = \Delta_{ti}$; если $\Delta_{tm} < \Delta_{ti}$, то $a_2 = \Delta_{tw}$.

Осевая виброскорость на частоте вращения, мм/с,

$$v_{1z} = 4{,}45 \cdot 10^{-3} f_1 a_2 G_a/G. \qquad (6.79)$$

Радиальная виброскорость на двойной частоте вращения, мм/с,

$$v_{2r} = 4{,}45 \cdot 10^{-3} f_1 \frac{G_a}{G}\frac{\Delta_0}{2}. \qquad (6.80)$$

Осевая виброскорость на двойной частоте вращения, мм/с,

$$v_{2z} = 4{,}45 \cdot 10^{-3} f_1 \frac{G_a}{G}\frac{3\Delta_0}{2}\sqrt{\frac{d_k}{\delta_e}}. \qquad (6.81)$$

Общий уровень виброскорости в радиальном направлении на частотах выше двойной частоты вращения, мм/с,

$$v_{4r} = 0{,}13 v_{k25} f_1 \frac{G_a}{G}. \qquad (6.82)$$

При отсутствии данных по v_{k25} можно воспользоваться значениями, приведенными ниже:

d_w, мм	v_{k25}, мм/с, при классе точности	
	0	6
До 40	0,9	0,28
Свыше 40 до 70	1,4	0,79
Свыше 70 до 120	3,5	1,4

Общий уровень виброскорости в осевом направлении на частотах выше двойной частоты вращения, мм/с,

$$v_{4z} = 1{,}3 v_{4r}, \text{ при } 2p = 2;$$

$$v_{4z} = 1{,}1 v_{4r} \text{ при } 2p > 2.$$

Общий уровень виброскорости от небаланса и подшипников в радиальном направлени, мм/с,

$$v_r = \sqrt{v_{1r}^2 + v_{2r}^2 + v_{4r}^2}. \qquad (6.83)$$

Общий уровень виброскорости от небаланса и подшипников в осевом направлении, мм/с,

$$v_z = \sqrt{v_{1z}^2 + v_{2z}^2 + v_{4z}^2}. \qquad (6.84)$$

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

МЕХАНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

7.1. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ДВИГАТЕЛЬ

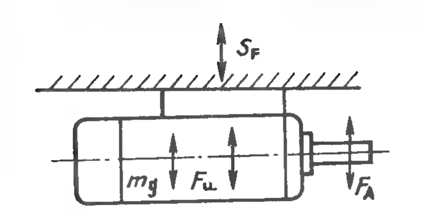
При эксплуатации на АД действуют динамические силы, источником которых может быть как сам АД (внутренние возбуждающие силы), так и силы от внешних источников (внешние возбуждающие силы). В первом случае речь идет о силах, вызванных неуравновешенностью ротора, во втором – о вибрационных силах, передаваемых через фундамент или через сопряженные с АД элементы. В любом случае эти силы имеют существенное значение для определения размеров несущих деталей АД (лап или фланцевых подшипниковых щитов). На стадии разработки АД возможен учет возникающих дополнительных сил для несущих деталей в виде дополнительных ускорений, определяемых оценочными критериями либо опытными данными.

Ниже приведен ряд методик определения динамических дополнительных сил. Для упрощения АД рассматривается как твердое тело, жестко закрепленное на колеблющемся фундаменте. Указаны пределы, при которых эти допущения справедливы, а также методы, позволяющие путем простых измерений определить динамические нагрузки на лапы и фланцевые подшипниковые щиты.

На рис. 7.1 показана схема возбуждения механических колебаний АД. При этом несущественно, что формулы выведены для АД исполнения по способу монтажа IM1071. При выводе формул предполагается, что динамические процессы периодические и описываются только одной гармонической. Сила тяжести mg не учитывается, так как вынужденные движения представляют собой колебания относительно статического положения равновесия.

Рассмотрим схемы замещения и уравнения движения при воздействии на АД каждого из перечисленных выше факторов.

Схема замещения при воздействии F_u представлена на рис. 7.2. Фундамент и двигатель предполагаются жесткими. С фундаментом АД связан через условную пружину с жесткостью C_u. Смещение АД с условной массой m_u относительно центра тяжести описывается координатой x_u.



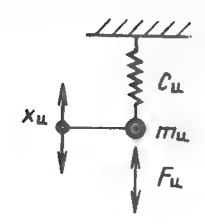


Рис. 7.1. Схема возбуждения механических колебаний АД:

F_u – силы, вызванные неуравновешенностью ротора; F_A – силы, передаваемые на АД от приводимого механизма через сопрягаемые с АД элементы; S_F – вибросмещение фундамента. Направления F_A и S_F произвольны

Рис. 7.2. Схема замещения двигателя при воздействии сил от дисбаланса ротора

Уравнение движения для этой системы

$$m_u \frac{d^2 x_u}{dt^2} + C_u x_u = F_u \sin \Omega_u t. \qquad (7.1)$$

Решение уравнения (7.1) можно представить в виде

$$x_u = A_u \sin \Omega_u t, \qquad (7.2)$$

тогда

$$d^2 x_u/dt^2 = -A_u \Omega_u^2 \sin \Omega_u t$$

и

$$A_u = \frac{F_u}{C_u} \frac{1}{1 - (\Omega_u/\omega_u)^2}, \qquad (7.3)$$

где

$$\omega_u = \sqrt{C_u/m_u} \qquad (7.4)$$

– собственная круговая частота системы.

На несущие детали АД действует сила $C_u x_u$. Из (7.2) с учетом (7.4) получаем

$$C_u x_u = \frac{m_u x_u}{(\Omega_u/\omega_u)^2}. \qquad (7.5)$$

Из (7.5) следует, что представление силы, действующей на несущие детали, в виде произведения массы на ускорение справедливо только при условии

$$\Omega_u \approx \omega_u.$$

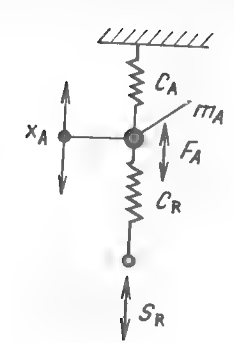


Рис. 7.3. Схема замещения двигателя при воздействии сил от приводимого механизма

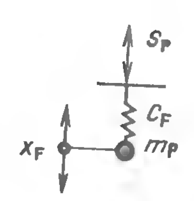


Рис. 7.4. Схема замещения двигателя при воздействии фундамента

Из (7.5) можно сделать также вывод, что если ω_u известно, то, измерив амплитуду ускорения в двух наиболее удаленных друг от друга точках станины в направлении, перпендикулярном фундаменту, можно рассчитать силы, действующие на несущие детали станины. Измерения проводятся в двух точках для уменьшения погрешности, вызванной представлением АД в виде точечной массы.

Представленная на рис. 7.3 колебательная система практически идентична системе на рис. 7.2. Так как точка приложения силы F_A (на роторе) изменилась, то условная масса m_A АД и жесткость C_A несущих деталей отличаются от приведенных выше. Формулы (7.1) – (7.5) справедливы и для рассматриваемого случая, только надо заменить индекс u на A.

Строго говоря, АД является двухмассовой системой. Сила F_A приложена к упругому ротору, имеющему массу и установленному в станине. Однако поскольку выше было оговорено, что АД представляет собой одномассовую систему, то определим границы, в которых такое упрощение допустимо. Если АД сочленяется с приводимым механизмом с помощью, например, ременной передачи, то возбуждающие колебания силы передаются на вал через ремень и шкив с жесткостью C_A.

Для уравнения движения получаем

$$m_A \frac{d^2 x_A}{dt^2} + C_A x_A + C_R (x_A - S_R) = 0, \tag{7.6}$$

где $S_R = S_A \sin \Omega_A t$.

Полагая

$$x_A = A_A \sin \Omega_A t,$$

получаем

$$d^2 x_A / dt^2 = -A_A \Omega_A^2 \sin \Omega_A t. \tag{7.7}$$

Решение уравнения (7.6)

$$A_A = \frac{S_A C_R / C_A}{1 + G_R/C_A - (\Omega_A/\omega_A)^2}, \tag{7.8}$$

где $\omega_A = \sqrt{C_A/m_A}$.

Из (7.8) следует, что если $C_R/C_A \ll 1$, что, как правило, справедливо, то A_A мало и сила, действующая на несущие детали АД, равна $C_A x_A$. Если условие $C_R/C_A \ll 1$ не выполняется, то расчет проводится при условии, что сила действует непосредственно на вал АД.

При передаче колебаний от фундамента условная масса двигателя m_F и жесткость C_F отличаются от рассмотренных ранее (рис. 7.4).

Уравнение движения

$$m_F \frac{d^2 x_F}{dt^2} + C_F (x_F - S_F) = 0, \tag{7.9}$$

где $S_F = S_0 \sin \Omega_F t$.

Полагая

$$x_F = A_F \sin \Omega_F t; \quad \frac{d^2 x_F}{dt^2} = -A_F \Omega_F^2 \sin \Omega_F t, \tag{7.10}$$

получаем решение

$$A_F = \frac{S_0}{1 - (\Omega_F/\omega_F)^2}, \tag{7.11}$$

где $\omega_F = \sqrt{C_F/m_F}$.

Несущие детали АД испытывают вибрационные силы

$$C_F (x_F - S_F) = \frac{(\Omega_F/\omega_F)^2}{1 - (\Omega_F/\omega_F)^2} C_F S_0 \sin \Omega_F t$$

или

$$C_F (x_F - S_F) = \frac{m_F S_F}{1 - (\Omega_F/\omega_F)^2}. \tag{7.12}$$

Выражение (7.12) подтверждает, что условие, при котором несущие детали АД дополнительно нагружены силой, равной произведению массы АД на амплитуду ускорения, справедливо при $\Omega_F \ll \omega_F$. Если это

условие не выполнено, то даже при $\Omega_F < \sqrt{2\omega_F}$ [это значение получено из условия равенства знаменателя в (7.12) минус 1] получают неправильные результаты. Однако высшие гармонические обычно имеют меньшее значение Ω_F, поэтому такой прием можно считать допустимым. Согласно (7.12) можно косвенно измерить нагрузку на несущих деталях, если на фундаменте в непосредственной близости от крепежных болтов лап АД определить зависимость ускорения, перпендикулярного плоскости фундамента, от частоты.

7.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ОДНОСТОРОННЕГО МАГНИТНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ

Для расчетов валов и подшипников необходимо знать силу одностороннего магнитного притяжения. Известно большое количество работ, в которых при определении этой величины исходят исключительно из геометрии, электрических параметров и магнитных нагрузок АД. Совпадение расчетных значений с фактическими данными неудовлетворительно.

На основе опытных данных сила одностороннего магнитного притяжения, приходящаяся на единицу длины начального статического эксцентриситета, Н/см, может быть определена по формуле

$$C \approx 125 \frac{D_a l_2}{\delta} B_g^2 \frac{1}{k_{g1}, k_{g2}} k_p k_a, \qquad (7.13)$$

где D_a – диаметр ротора, см; l_2 – длина пакета ротора, см; δ – односторонний воздушный зазор, см; B_g – максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл; k_{g1}, k_{g2} – коэффициенты Картера для статора и ротора соответственно; k_p – коэффициент, зависящий от числа полюсов: $k_p = 1$ при $2p > 2$, $k_p = 0{,}5$ при $2p = 2$; k_a – коэффициент, зависящий от числа параллельных ветвей обмотки статора.

Коэффициент k_a при последовательном соединении катушечных групп определяют по табл. 7.1.

Таблица 7.1

Вид ротора	Коэффициент k_a при режимах работы АД		
	Холостой ход	Короткое замыкание	Номинальный
Короткозамкнутый	0,17	1,1	0,25
Фазный	0.6	1,1	0.7

При параллельном соединении катушечных групп возникают факторы, которые по литературным данным снижают коэффициент k_a до 35% при короткозамкнутом роторе и до 85% при фазном.

Если оценка силы по (7.13) показывает, что нагрузки вала или подшипников близки к критическим или возникает опасность потери механической устойчивости при пуске, то рекомендуется определить действительное значение силы одностороннего магнитного притяжения при испытании макетных образцов со специально созданным статическим эксцентриситетом. В рамках таких исследований в режиме холостого хода было обнаружено увеличение силы магнитного притяжения до 50% по сравнению с рассчитанной по (7.13).

7.3. РАСЧЕТ ВАЛОВ И ПОДШИПНИКОВ

Расчет вала на жесткость и прочность, расчет срока службы подшипников качения не является проблемой, если нагрузка известна. Для этого случая эффективные расчетные алгоритмы приведены в любой специальной литературе. Кроме того, на некоторых предприятиях существуют специальные расчетные методики или стандарты. Например, стандартом предприятия задано соответствие вращающего момента (номинальной мощности) и диаметра свободного конца вала по условиям привода. Сложности заключаются не в самом расчете вала, а скорее в установлении предельно допустимой нагрузки. Так как при разработке серии мы имеем дело с АД общего назначения, условия эксплуатации которых чаще всего неизвестны, конструктор должен рассчитать вал для нагрузки, соответствующей широкому кругу потребителей.

Для того чтобы обеспечить надежную работу АД в эксплуатации и свести к минимуму запросы заказчиков, целесообразно выбирать размеры вала и подшипников таким образом, чтобы при некотором превышении номинальной нагрузки полностью обеспечивалась работоспособность АД. Оправдали себя диаграммы, устанавливающие предельно допустимую нагрузку на выступающий конец вала в зависимости от определенных критериев. В этом случае потребитель в зависимости от условий работы привода может использовать АД так, чтобы его вал и подшипники не были перегружены.

Расчет нагрузочных диаграмм очень трудоемок, так как итеративным путем приходится определять предельно допустимую силу на рабочем конце вала в зависимости от прогиба вала, запаса по усталостной прочности, срока службы подшипников. Для этого удобно использовать матричное исчисление, тем более что оно лучше всего поддается программированию и проведению расчета на ЭВМ.

Диаграмма предельно допустимой радиальной нагрузки на свободный конец вала может быть представлена в двух вариантах:

$F_r = f(F_a)$ – радиальная сила зависит от аксиальной силы F_a;

$F_r = f(z)$ – радиальная сила зависит от места ее приложения к рабо-

чему концу вала (z – расстояние от заплечика вала до точки приложения силы).

Первая зависимость обычно используется для АД малых и средних высот оси вращения. Для высот оси вращения примерно свыше 280 мм в большинстве случаев применяется вторая зависимость, а влияние аксиальной силы учитывается указанием ее предельного значения.

При составлении нагрузочных диаграмм предельно допустимые радиальные нагрузки на рабочий конец вала $F_r = f(F_A)$ вычисляются так, чтобы соблюдались следующие ограничения:

прогиб вала посредине сердечника ротора не должен превышать заданного предельного значения; ориентировочно $w = 0{,}1\ \delta$, где δ – односторонний воздушный зазор;

угол прогиба вала в подшипниках *PHI* не должен превышать заданного предельного значения – ориентировочно 0,001;

коэффициент прочности вала в каждом сечении не должен быть ниже заданного предельного значения; ориентировочно $s = 1{,}5 \div 2$;

расчетный срок службы подшипников качения не должен быть ниже предельного значения; ориентировочно $L = 10\,000 \div 20\,000$ ч.

Многолетний опыт показывает, что этих четырех критериев достаточно для описания нагружения ротора при работе АД и сведения числа отказов до минимума.

Площадь, ограниченная нагрузочной диаграммой и осями координат (на рис. 7.5 заштрихована), представляет собой область, в которой все четыре ограничения выполнены. Рассмотрим пример пользования диаграммой. Пусть при зубчатой передаче определяют силы F_{r0}, F_{a0}. Проверка дает недопустимую нагрузку вала (значение F_{r0} находится вне заштрихованного участка). Увеличением диаметра делительной окружности радиальная сила может быть снижена до допустимого значения F_{r1} (F_{a0} принимается постоянной).

Значение предельно допустимой радиальной нагрузки существенно зависит от условий эксплуатации АД, частоты вращения, исполнения по способу монтажа, срока службы подшипников, направления и места приложения реакции передачи, дополнительных вибраций, передаваемых на АД через фундамент. Не все влияющие факторы условий эксплуатации могут учитываться в нагрузочных диаграммах, поэтому следует ограничиться наиболее существенными.

На рис. 7.6 представлены нагрузочные диаграммы с числом полюсов и формой исполнения в качестве параметров. Влияние числа полюсов однозначно; влияние других эксплуатационных параметров может быть учтено следующим образом.

Форма исполнения по способу монтажа. Расположением вала – горизонтальным (например, IM1001 или $\gamma = 0$) или вертикальным (например, IM1011, IM1031 или $\gamma = 90, 270°$) – можно учесть исполнение по способу монтажа с достаточной точностью. Способы монтажа, отличные от приведенных, могут быть учтены интерполяцией или расчетом при заданном γ.

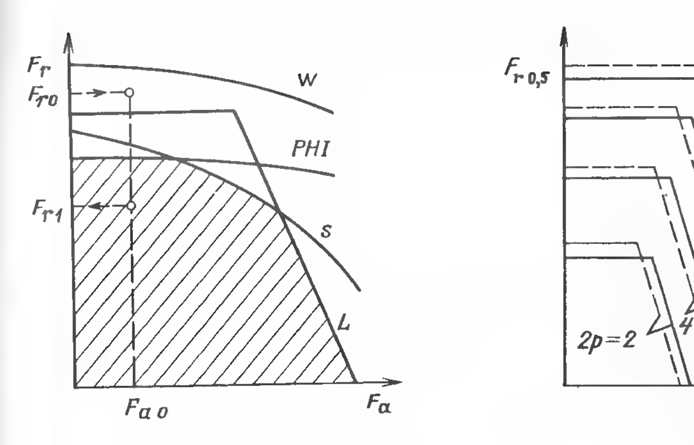


Рис. 7.5. Нагрузочная диаграмма

Рис. 7.6. Нагрузочные диаграммы двигателей:
—— – вертикальное расположение вала; – – – – горизонтальное расположение вала

Срок службы подшипников. Расчетный срок службы подшипников является очень важным параметром, так как при $z/l = 0{,}5$ (рис. 7.6) нагрузочная диаграмма почти исключительно определяется кривой срока службы (кривая L на рис. 7.5). Как правило, задается расчетный срок службы 20 000 ч.

Направление и место приложения реакции передачи. Направление и место приложения радиальной и осевой сил представлены на рис. 7.7. Вычисляют допустимые нагрузки при $R = 0$, действующей в обоих направлениях силе F_a, $\varphi_r = 0$ и $180°$, $z/l = 0{,}5$ (рис. 7.7); и для составления нагрузочной диаграммы используют самый неблагоприятный случай. Если рассчитанная для определенного вида сопряжения АД с приводимым механизмом радиальная сила приложена не на середине ($z/l \neq 0{,}5$), то с помощью коэффициента пересчета по соотношению $F_{r05} = F_F F_r$ можно привести ее к эквивалентной радиальной силе, приложенной к середине, и воспользоваться нагрузочной диаграммой $F_{r05}(F_a)$. Коэффициент пересчета F_r может быть установлен как для отдельных типов АД, так и для серии в целом.

Дополнительным вибрациям подвергается АД при колебаниях фундамента. Эти виброускорения принимают жестко связанными с телом в направлениях x, y и z (рис. 7.8). Нагрузочные диаграммы, как правило, вычисляют без дополнительных ускорений. Но для внутризаводского пользования целесообразно составить нагрузочные диаграммы с учетом дополнительных ускорений при экстремальных условиях эксплуатации (приводы экскаваторов, дробилок и т.д.).

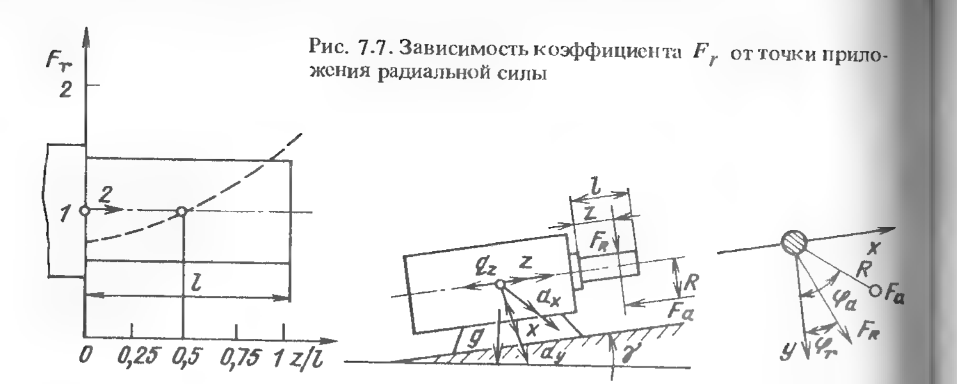


Рис. 7.7. Зависимость коэффициента F_r от точки приложения радиальной силы

Рис. 7.8. Определение места приложения и направления силы реакции передачи и дополнительных ускорений

В связи с отсутствием более подходящих методов радиальные и осевые силы передачи определяют умножением номинальных значений сил на эмпирические коэффициенты, приведенные ниже.

При сочленении АД с приводимым механизмом с помощью упругой муфты радиальную силу, Н, действующую на конец вала при условии полной соосности валов АД и механизма, вычисляют по эмпирической формуле

$$F_{rk} = 5700\sqrt{P/n}, \qquad (7.14)$$

где P – полезная мощность на валу, кВт; n – частота вращения, об/мин.

Момент, передаваемый муфтой, Н · м, равен

$$M_t = \frac{9750P}{n} C, \qquad (7.15)$$

где C – коэффициент, определяемый по табл. 7.2.

При ременной передаче радиальную силу, Н, вычисляют из соотношения

$$F_{rR} = 1{,}96 \cdot 10^7 \frac{P}{nD} C_v, \qquad (7.16)$$

где D – диаметр шкива, мм; C_v – коэффициент, зависящий от вида ремня и его натяжения, его значения приведены ниже:

Вид привода	C_v
Клиновый ремень	2–2,5
Плоский кожаный ремень с натяжным роликом	2,5–3
Плоский ремень без натяжного ролика	4–5

Таблица 7.2

Характер нагрузки	Применение	Коэффициент C для АД	
		с короткозамкнутым ротором	с фазным ротором
Нечастые запуски, редко меняющаяся нагрузка, отдельные кратковременные перегрузки	Нормально нагруженные приводы	1,3–1,7	1–1,4
Частые запуски, меняющаяся нагрузка, перегрузки	Компрессоры, прессы, приводы с поршневыми машинами	1,9–2,9	1,6–2,6

Радиальные силы, Н, при цепной передаче

$$F_{rk} = 1{,}96 \cdot 10^7 \frac{P}{nD_t} C_k C_d. \qquad (7.17)$$

Радиальные силы, Н, при прямозубой передаче с углом зацепления $\alpha = 20°$

$$F_{rz} = 2{,}07 \cdot 10^7 \frac{P}{nD_t} C_k C_d. \qquad (7.18)$$

При косозубых передачах с углом скоса β_0 радиальная и аксиальная силы соответственно равны, Н,

$$\left.\begin{aligned} F_{rs} &= \frac{1}{\cos\beta_0} 2{,}07 \cdot 10^7 \frac{P}{nD_t} C_k C_d; \\ F_{as} &= \operatorname{tg}\beta_0 \cdot 1{,}96 \cdot 10^7 \frac{P}{nD_t} C_k C_d. \end{aligned}\right\} \qquad (7.19)$$

Таблица 7.3

Точность изготовления шестерен	C_k при числе зацеплений	
	1	2
Погрешность шага и формы 0,02 мм (прецизионные шестерни)	1,05–1,1	0,6–0,7
Строганые и фрезерованные шестерни. Погрешность шага и формы 0,02 – 0,1 мм	1,1–1,3	0,7–0,8
Погрешность более 0,1 мм	1,5–2,2	–

где D_t – диаметр делительной окружности, мм; C_k – коэффициент, учитывающий дополнительную силу, возникающую в зубчатых и цепных передачах (табл. 7.3); C_d – коэффициент, учитывающий вид приводимого механизма (табл. 7.4).

Таблица 7.4

Вид приводимых механизмов	C_d
Установки для обработки пищевых продуктов	
Мукомольные мельницы	1,1–1,2
Тестомесильные машины	1,2–1,5
Вальцовые прессы для сахарного тростника	1,5–2
Целлюлозные, текстильные и печатные машины	
Бумагоделательные машины, приводы рулона, сортировочные установки, отбельные роллы, кордочесальные машины, машины прядильного производства, ротационные и акцидентные печатные машины	1–1,1
Шлифовальные машины, рафинеры, конусные мельницы, сельфакторы, прессы	1,1–1,2
Каландры	1,2–1,3
Роллы, окорочные барабаны, бегуны, стиральные машины с поступательным движением барабана, ткацкие станки	1,2–1,5
Древорубки	1,5–2
Вибромеханизмы, плоские сита	1,5–2,5
Обрабатывающие станки	
Рольганги и роликовые питатели с прерывным движением, передвижные столы, буровые машины, фрезерные и шлифовальные станки, ленточно-пильные и кругопильные станки, токарные и фрезерные станки по дереву	1,1–1,3
Лесопильные рамы	1,2–1,3
Вибрационные формовочные машины для литейных цехов, волочильные, холоднопрокатные и проволочно-прокатные станы, резиновые каландры	1,3–1,6
Пружинные молоты, ножницы для резки листового металла, прессы	1,3–2
Токарные и строгальные станки, станки с поступательным движением	1,4–1,6
Рольганги с реверсивными роликами, прокатные станы для резины	1,5–2
Прокатные станы с маховиком на тихоходном валу	1,5–2,5
Черновые и заготовочные прокатные станы с маховиком на быстроходном валу, копры, падающие молоты	2–3
Листовые станы с маховиком на быстроходном валу	2–3
Машины	
Электрические машины, турбины	1,0–1,1
Электрические тяговые двигатели в раме локомотива	1,1–1,2
Электрические тяговые двигатели с моторно-осевыми подшипниками, двигатели внутреннего сгорания, поршневые паровые машины	1,2–1,5
Передачи для привода больших групп рабочих машин	1,1–1,3
Транспортные средства и подъемные устройства	

Таблица 7.4 (продолжение)

Вид приводимых механизмов	C_d
Ленточные конвейеры, подвесные канатные дороги, центробежные насосы, воздуходувки, турбокомпрессоры	1–1,2
Рудничные вентиляторы	1,1–1,3
Лифты, краны	1,2–1,3
Поршневые компрессоры	1,2–1,5
Поршневые насосы в зависимости от балансировки	1,5–1,6
Шахтные подъемные установки	1,5–1,8
Качающиеся конвейеры	1,5–2,5
Дробильно-размольные, обогатительные и строительные машины	
Обогатительные установки, мешалки, вращающиеся трубчатые печи, холодильные барабаны	1,1–1,2
Помольные установки для шлама и цемента, сушильные барабаны	1,3–1,4
Отсадочные машины; размер частиц от 0,5 до 10 мм	1,3–1,5
Отсадочные машины; размер частиц от 10 до 30 мм	1,4–1,6
Отсадочные машины; размер частиц от 30 до 80 мм	1,6–1,8
Шаровые, барабанные шаровые мельницы, бегуны	1,5–1,7
Конусные, щековые дробилки, молотковые и центробежные мельницы	1,5–1,8
Вибростолы, вибросита	1,5–2
Экскаваторы	1,5–2,5
Вальцовые станки	1,8–2,2
Почвенные мотобуры, станки для глубокого сверления	2–2,2

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

КОНСТРУКЦИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ АИ

8.1. ВОПРОСЫ ЭСТЕТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Впервые в практике электромашиностроения при проектировании серии АИ была проведена эстетическая оценка внешнего вида АД на основе принципов дизайна (рис. 8.1).

Электрические машины мало вступают в физические и психофизические контакты с человеком. Поэтому учет эргономических требований при проектировании АД сводится к удобству их монтажа и встраивания в различные механизмы.

Были рассмотрены более 100 образцов АД 28 передовых зарубежных фирм и серий социалистических стран. Проведен анализ механизмов, в которых использовались АД.



Рис. 8.1. Основные принципы дизайна

Главные проблемы при выполнении требований эстетической внешней формы АД: оптимальная технология, максимально возможное охлаждение, удобство подключения.

Видимыми частями АД со степенью защиты IP44 являются: станина, вводное устройство, щит со стороны свободного конца вала, кожух вентилятора.

Проведены исследования визуальных впечатлений при оребрении корпуса с прилитым вводным устройством и оребрении щита со стороны свободного конца вала и от кожуха вентилятора. Рассматривались три общих вида:

1) контур оребрения "квадратный", ребра продольно-поперечные;

2) контур оребрения круглый, ребра у АД с высотами оси вращения от 50 до 180 мм продольно-поперечные, а у больших высот оси вращения (200–355 мм) – радиальные;

3) контур оребрения АД всей серии "квадратный", оребрение радиальное.

Во всех случаях корпуса малых АД отливаются в кокиль, более крупных АД – в землю. Во втором случае круглый контур оребрения позволяет несколько снизить расход металла. Однако по мнению специалистов "квадратный" контур оребрения создает впечатление стабильности и несколько больше соответствует современным формам.

Для серии АИ были приняты первый и второй варианты. Как будет показано ниже, продольно-поперечное оребрение и применение для литья

Рис. 8.2. Внешний вид АД с высотой оси вращения 80 мм

а)

б)

Рис. 8.3. Двигатель с высотой оси вращения 80 мм с продольно-поперечным (*а*) и радиальным оребрением (*б*)

под давлением кокилей с четырехсторонним разъемом обеспечивают значительную экономию металла. Однако по условиям технологии это сравнительно просто удается на АД с высотами оси вращения 50 – 132 мм, для больших высот во многих случаях приходится использовать радиальное оребрение.

С точки зрения эстетики гармоничные пропорции создает высота ребер, меньшая высоты оси вращения электродвигателя примерно в 5,5 раза.

Оба щита по форме одинаковы. Щиты круглые, гладкие или с ребрами. Для серии АИ в основном приняты гладкие щиты, имеющие вверху коническую наружную поверхность с конусностью 15%, ширина щита ориентировочно равна 1/8 его внешнего диаметра. Для крепления щитов предусмотрены равномерно расположенные приливы (три, четыре или шесть).

Конфигурация кожуха вентилятора повторяет геометрию контура ребер, и размеры его в основном определяются необходимостью оптимизации работы вентилятора. Пропорциональная глубина кожуха – 1/2 высоты оси вращения. Вентиляционные отверстия с торца кожуха – квадратные размером 8 × 8 мм.

Для станин, отливаемых в кокиль, корпус вводного устройства отливается вместе со станиной. Как с точки зрения эстетики, так и с позиций удобства монтажа вводное устройство размещено сверху. Оно имеет прямоугольную форму. Размеры определяются в основном удобством подключения подводящего кабеля.

С позиций эстетики рекомендуются следующие размеры вводного устройства: высота 0,5–0,55 высоты оси вращения, длина 2,4 высоты, отношение ширины к длине 1 : 1,3.

Лапы – L-образной формы с упрочняющими ребрами.

На рис. 8.2, 8.3 показаны примерные варианты оформления АД.

8.2. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И АКТИВНАЯ ЧАСТЬ ДВИГАТЕЛЕЙ

Электротехническая сталь. В АД серии АИ применена электротехническая сталь толщиной 0,5 мм: нелегированная, требующая отжига после штамповки, слабо- и среднелегированная с электроизоляционным покрытием. Некоторые страны применяют для ряда исполнений электротехническую сталь толщиной 0,65 мм.

Электромагнитные свойства (гарантированные значения) сталей приведены в табл. 8.1. Магнитная анизотропия стали при B_{25} – не более 0,08 Тл.

В СССР для серии АИ приняты марки электротехнической стали, приведенные в табл. 8.2.

Таблица 8.1

Степень легирования кремнием	Толщина, мм	Удельные потери $P_{1,5/50}$, Вт/кг, не более	Индукция B_{25}, Тл, не менее	Примечание
Нелегированные	0,50 0,65	5,8 7,0	1,65 1,65	После отжига при 760–780 °С в защитной среде
Слаболегированные	0,50 0,65 0,50	5,0 6,3 4,0	1,60 1,60 1,58	В состоянии поставки с электроизоляционным покрытием

Таблица 8.2

Марки стали	Потери $P_{1,5/50}$, Вт/кг	Индукция B_{25}, Тл	Высота оси вращения, мм
2013	5,6	1,65	45–63
2212	5	1,6	160–250
2214	4,5	1,62	71–250
2312	4	1,56	280–355
2412	2,5	1,5	280–355

В результате совместно проведенных научно-исследовательских работ были сформулированы следующие требования к геометрии и механотехнологическим свойствам электротехнической стали:

Предельное отклонение по толщине, мм	0,03
Предельное отклонение по ширине рулонов, по ширине и длине листа, %	0,05
Разнотолщинность, не более	1/2 суммы предельных отклонений по толщине
Неплоскостность, мм, не более	4 (рулон) 2 (лист)
Отношение высоты неплоскостности к ее длине, %, не более	2 (лист, лента) 1 (рулон)
Серповидность, мм, на 1 м длины	3 (при ширине до 250 мм) 2 (при ширине свыше 250 мм)
Телескопичность рулона, мм, не более	5
Минимальное число перегибов	2 (2212, 2214) 2 (2312) 1 (2412)
Предел прочности, МПа	290–490 (2013) 290–590 (2212, 2214, 2312, 2412)
Толщина покрытия (на одной стороне), мм	0,005

Таблица 8.3

Наименование	Класс нагревостойкости B	Класс нагревостойкости F
Изоляция обмоточного провода	Модифицированная полиэфирная и полиэфиримидциануратная эмаль	
Пазовая изоляция	Полиэфирная пленка	Полиэфирная пленка, оклеенная с двух сторон бумагой из ароматического полиамида
	Полиэфирная пленка, оклеенная с одной стороны или с двух сторон полиэфирной бумагой	Полиэфирная пленка, оклеенная с двух сторон полиэфирной бумагой, предварительно пропитанной нагревостойким связующим
Межфазная изоляция	То же	То же
Пазовая крышка	То же или стеклопластик профильный класса B	То же или стеклопластик профильный класса F
Пропиточный состав	Составы без растворителей на основе ненасыщенного полиэфира, полиэфиримида класса F	Состав без растворителей на основе полиэфиримида, ненасыщенного полиэфира класса F Кремнийорганический лак
Выводные провода	Нагревостойкие провода с эластомерной изоляцией без оплетки с повышенной механической прочностью на прорезание	
Изоляция выводов и соединений	Трубки армированные	–
	Трубки термоусаживающиеся	–
Бандажировка лобовых частей	Шнур полиэфирный	Шнур стеклянный или полиэфирный

Провода и система изоляции. Для АД с высотами оси вращения 45–63 мм принята система изоляции класса нагревостойкости B, для высот оси вращения 71–250 мм – изоляция нагревостойкости классов B или F, для высот оси вращения 280–355 мм – класса F. Для обеспечения высокой надежности в СССР для АД с высотами оси вращения 71–250 мм принята изоляция класса нагревостойкости F при нагреве обмотки, соответствующем классу B.

Для всех высот оси вращения принят эмалированный провод с изоляцией класса нагревостойкости F.

Изоляционные материалы, принятые для серии АИ в СССР, приведены в табл. 8.3.

Значения максимальной односторонней толщины пазовой изоляции приведены ниже:

Высота оси вращения, мм	Толщина изоляции, мм
46–80	0,2
90–132	0,3
160–250	0,4
280–355	0,5

Толщина пазовой крышки должна быть не менее значений, указанных ниже:

Высота оси вращения, мм	Толщина изоляции, мм
45–80	0,3
90–100	0,35
112–132	0,4
160–250	0,5

Активная часть двигателей. Сердечники статора двигателей с высотами оси вращения 45–132 мм скрепляются сваркой, а с высотами оси вращения 160–355 – с помощью скоб. Для снижения магнитного шума и уменьшения добавочных моментов АД ряда высот оси вращения имеют скос пазов ротора на одно зубцовое деление.

Обмотка АД с высотами оси вращения 45–250 мм всыпная, из круглого провода, укладывается в полузакрытые пазы статора. В АД с высотами оси вращения 280–355 мм применяют жесткие секции из прямоугольного провода, укладываемые в полуоткрытые пазы статора.

Обмотка АД с высотами оси вращения 45–132 мм однослойная, концентрическая либо "вразвалку" (для двухполюсных машин).

Двигатели с высотами оси вращения 160–250 мм имеют одно-двухслойную обмотку. Всыпные обмотки всех двигателей позволяют осуществить их механизированную укладку в статор.

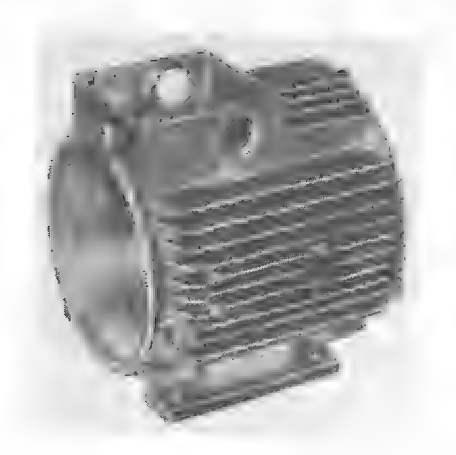
Обмотки короткозамкнутых роторов АД всех высот вращения выполняются заливкой сердечника ротора алюминием. Одновременно отливаются короткозамыкающие кольца с вентиляционными лопатками и для ряда высот оси вращения – со штырями для крепления балансировочных грузов.

8.3. ОБОЛОЧКА ДВИГАТЕЛЕЙ

Станины АД с высотами оси вращения 45–112 мм выполняют из высокопрочного алюминиевого сплава, с продольно-поперечным оребрением, с прилитым корпусом вводного устройства, с лапами (рис. 8.4) или без лап.

Данные оребрения станин АД с высотами оси вращения 45–132 мм с продольно-поперечными ребрами приведены в табл. 8.4.

Для АД с высотами оси вращения 132–250 мм приняты станины из чугуна с радиальными ребрами. Станины АД с высотами оси вращения 132–180 мм могут отливаться также из алюминиевого сплава. Чугунные станины отливают при привязке рядов мощностей и установочных размеров по варианту P вместе с лапами, а по варианту C – без лап. В последнем случае лапы отливают отдельно и приворачивают к станине. Этим обеспечивается максимальная унификация станин обоих вариантов увязки. Для крепления лап в станине АД с высотами оси вращения 160–180 мм предусмотрены утолщения с поперечными ребрами. Свер-



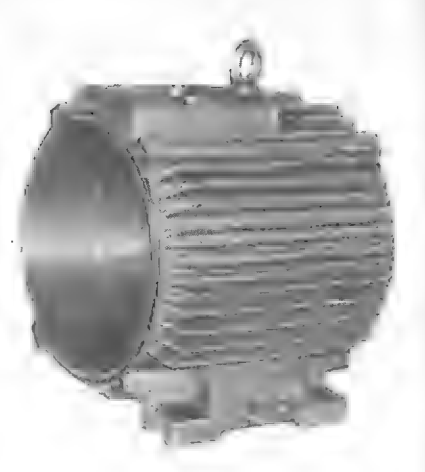


Рис. 8.4. Станина двигателя из алюминиевого сплава с прилитыми коробкой выводов и лапами (высота оси вращения 80 мм)

Рис. 8.5. Станина двигателя из чугуна с прилитыми лапами (высота оси вращения 180 мм)

Таблица 8.4

Высота оси вращения, мм	Высота ребра, мм	Шаг оребрения, мм	Отношение полной поверхности станины с ребрами к поверхности станины без ребер
45	11	10	2,05
56	12	12	2,23
63	14	12	2,56
71	17,5	9,2	3,7
80	19	9,5	4,1
90	20	9,7	4,2
100	23	9,8	4,4
112	19	16,5	2,86
132	21,5	16,5	2,71

Таблица 8.5

Высота оси вращения, мм	Высота ребра $h_р$, мм	Коэффициент оребрения $k_{ор}$	Шаг оребрения $t_р$, мм
160	27	3,2	17,8
180	30	2,6	20,4
200	30	2,6	21,4
225	34	2,7	25,4
250	40	2,7	29,0

Примечание. Коэффициент оребрения – отношение полной поверхности станины с учетом оребрения к поверхности гладкого цилиндра с размерами, равными внешнему диаметру и длине станины.

ху предусматривают площадку для крепления вводного устройства (рис. 8.5).

Проведенные исследования показали, что продольно-поперечное оребрение позволяет на 10–20% снизить массу станины по сравнению с радиальным оребрением при одной и той же поверхности охлаждения.

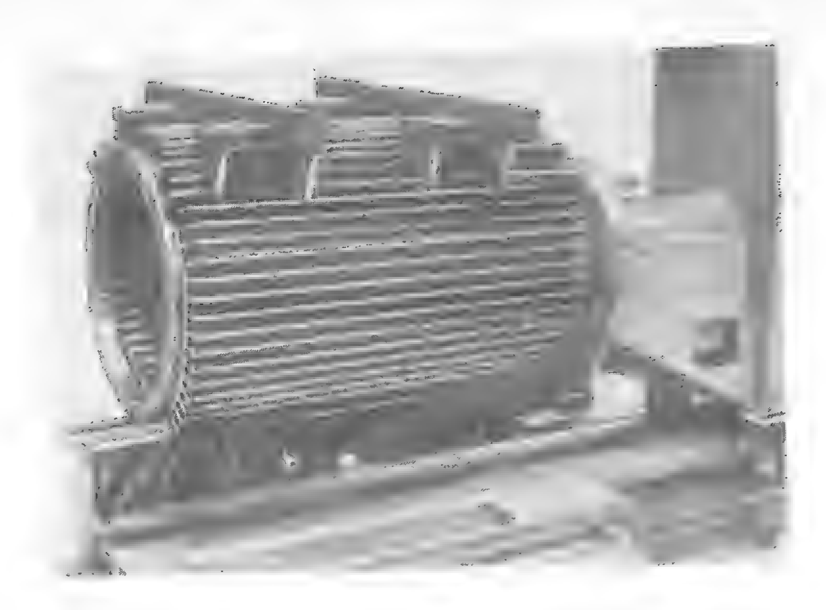


Рис. 8.6. Станина из гофрированного стального листа на автоматизированной линии

Поэтому в СССР и других странах проводятся интенсивные работы по созданию технологии чугунного литья, обеспечивающего получение продольно-поперечного оребрения.

Параметры радиального оребрения чугунных станин приведены в табл. 8.5.

Подшипниковые щиты АД 71–355-го габаритов выполнены литыми из чугуна, а 45–63-го габаритов – из алюминиевого сплава. В двигателях с высотами оси вращения 200–250 мм щиты имеют внутреннее оребрение для улучшения отвода теплоты в зоне лобовых частей обмотки статора. В остальных габаритах щиты гладкие. Относительно небольшая глубина щитов придает им жесткость.

Подшипниковые щиты имеют внутреннюю замковую поверхность, полностью прилегающую к станине.

В СССР в АД с высотами оси вращения 280–355 мм использованы станины из гофрированной рулонной стали толщиной 2–2,5 мм, изготовляемые на специальной автоматизированной линии.

Конструкция станины показана на рис. 8.6.

Гофрированная обечайка приваривается непосредственно к сердечнику статора. Два стальных кольца с торцов обечайки предусмотрены для крепления подшипниковых щитов.

8.4. ПОДШИПНИКОВЫЕ УЗЛЫ

Двигатели всех высот оси вращения имеют подшипники качения. В высотах оси вращения 45–112 мм предусмотрены шариковые подшипники типа 2RS легкой серии с двухсторонним уплотнением и постоянно заложенной смазкой, рассчитанной на весь срок службы подшипника.

В СССР такие подшипники легкой серии применяют в АД 45–100-го габаритов, а в АД с высотами оси вращения 112–180 мм – типа 2RS средней серии. Срок службы подшипников 20 000 ч.

Ряд стран допускает применение подшипников типа Z.

Для снижения уровней шума и вибрации в подшипниковых узлах АД с высотами оси вращения 45–132 мм используют пружинные шайбы, поджимающие подшипники.

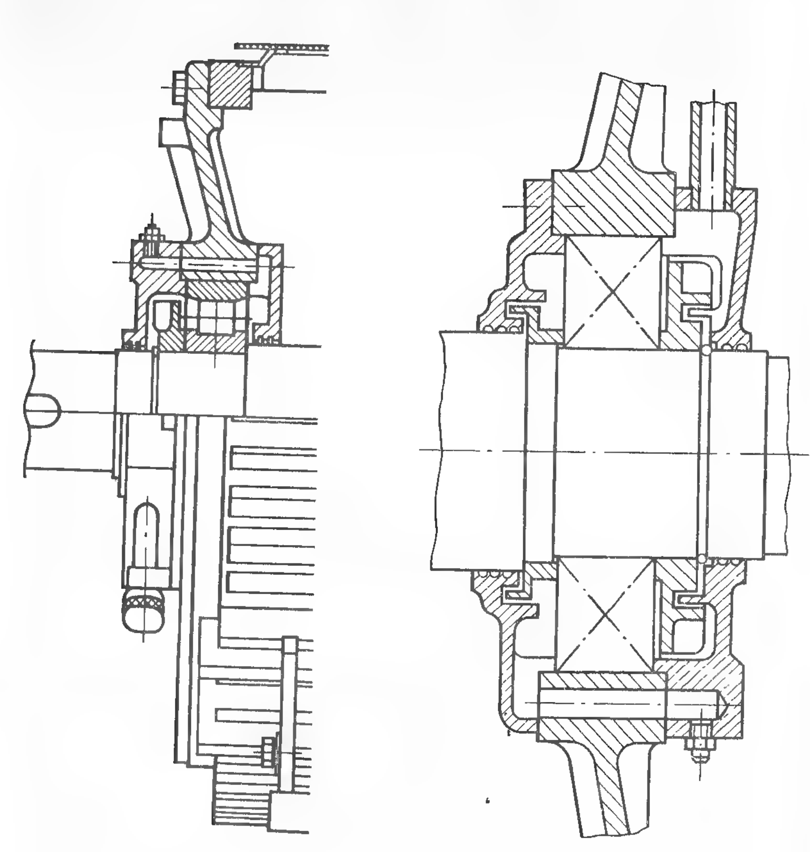


Рис. 8.7. Подшипниковый узел с лабиринтными уплотнениями

Рис. 8.8. Устройство для пополнения смазки подшипников

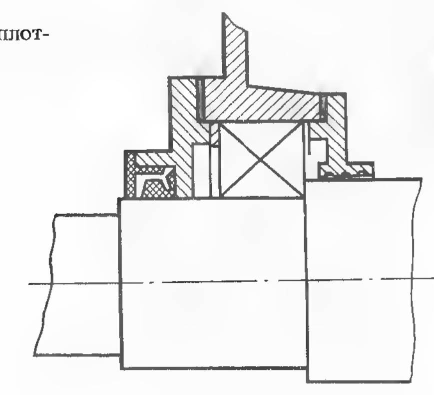


Рис. 8.9. Резиновые самоподжимные уплотнения V-образной формы

Двигатели с подшипниками типа 2RS с высотами оси вращения 45 – 132 мм имеют только наружные крышки. В СССР АД с высотами оси вращения 160–180 мм имеют со стороны рабочего конца вала одну крышку, с противоположной стороны – две подшипниковые крышки, зажимающие и фиксирующие подшипник.

Двигатели с высотами оси вращения 200 и 225 мм имеют на обеих опорах шариковые подшипники: средней серии со стороны рабочего конца вала и легкой – со стороны вентилятора. Это позволяет снизить массу и шум в подшипниковых узлах.

В АД с высотами оси вращения 250–355 мм, кроме двухполюсных, установлены со стороны свободного конца вала роликовые подшипники, с противоположной стороны – шариковые. Все двухполюсные АД имеют два шариковых подшипника.

Подшипниковые узлы АД с высотами оси вращения 200–355 мм выполнены с лабиринтными уплотнениями (рис. 8.7) и имеют устройства для пополнения и замены смазки без разборки (рис. 8.8). В ряде стран для обеспечения лучшей защиты используются резиновые самоподжимные уплотнения V-образной формы (рис. 8.9).

В большинстве типоразмеров применены подшипники с индексом Ш2 (с пониженным уровнем шума). Типы и номера подшипников, применяемых в СССР в АД серии АИ, приведены в табл. 8.6.

Таблица 8.6

Высота оси вращения, мм	Подшипник со стороны вентилятора		Подшипник со стороны рабочего конца вала	
	$2p=2$	$2p\geqslant4$	$2p=2$	$2p\geqslant4$
45	5-80018С9Ш2У	5-80018С9Ш2У	5-80018С9Ш2У	5-80018С9Ш2У
50	5-80200С9Ш2У	5-80200С9Ш2У	5-80200С9Ш2У	5-80200С9Ш2У
56	5-80201С9Ш2У	5-80201С9Ш2У	5-80201С9Ш2У	5-80201С9Ш2У
63	5-80202С9Ш2У	5-80202С9Ш2У	5-80202С9Ш2У	5-80202С9Ш2У
71	76-180204КС9Ш2У	76-180204КС9Ш2У	76-180204КС9Ш2У	76-180204КС9Ш2У

Таблица 8.6 (продолжение)

Высота оси вращения, мм	Подшипник со стороны вентилятора		Подшипник со стороны рабочего конца вала	
	$2p=2$	$2p\geqslant 4$	$2p=2$	$2p\geqslant 4$
80	76-180205КС9Ш2У	76-180205КС9Ш2У	76-180205КС9Ш2У	76-180205КС9Ш2У
90	76-180206С9Ш2У	76-180206КС0Ш2У	76-180206КС9Ш2У	76-180206КС9Ш2У
100	76-180306КС9Ш2У	76-180306К2С9Ш2У	76-180306К2С9Ш2У	76-180306К2С9Ш2У
112	76-180307К4С9Ш2У	76-180307К4С9Ш2У	76-180307К4С9Ш2У	76-180307К4С9Ш2У
132	76-180309С9Ш2У	76-180309С9Ш2У	76-180309С9Ш2У	76-180309С9Ш2У
160	76-180510С9Ш2У	76-180510С9Ш2У	76-180610С9ШУ2	76-180610С9ШУ2
180	76-180512С9ШУ2	76-180512С9ШУ2	76-180612С9ШУ2	76-180612С9ШУ2
200	6213ШУ2	6213ШУ2	6313ШУ2	6313ШУ2
225	6214ШУ2	6214ШУ2	6314ШУ2	6314ШУ2
250	6317ШУ2	6317ШУ2	6317ШУ2	5-2317К1Ш2У
280	70-317	70-317	70-317	5-2317К1Ш2У
315	70-319К5	70-319К5	70-319К5	5-2319КМ
355	70-322	70-322	70-322	5-2322Л1

8.5. ВЕНТИЛЯТОРНЫЕ УЗЛЫ

Двигатели серии АИ со степенью защиты IP54 (IP44) имеют способ охлаждения IC0141 или IC0151. При таком способе охлаждения весь теплосъем осуществляется через ребристую станину, обдуваемую наружным вентилятором.

Двигатели с высотой оси вращения 50–132 мм имеют вентилятор и кожух из пластмассы; допускается также применение литого вентилятора из алюминиевого сплава и стального кожуха.

Двигатели с высотами оси вращения свыше 132 мм имеют вентилятор из алюминиевого сплава, армированный стальной втулкой, и кожух из стального проката.

В АД с высотами оси вращения до 112 мм вентилятор фиксируется с помощью рифления на валу, а в двигателях с высотами оси вращения 160 мм и выше посадка вентилятора осуществляется на шпонку.

Кожух с торца снабжен решеткой для входа воздуха. Окна решетки размером не более 8×8 мм обеспечивают современные требования по технике безопасности. Для улучшения использования воздушного потока и повышения КПД вентиляторного узла диаметр кожуха в ряде высот оси вращения несколько меньше диаметра станины по ребрам.

В АД с высотами оси вращения 280–355 мм с гофрированной станиной имеется также внутренний вентилятор, который прогоняет горячий воздух по полым ребрам станины. Таким образом, станина представляет

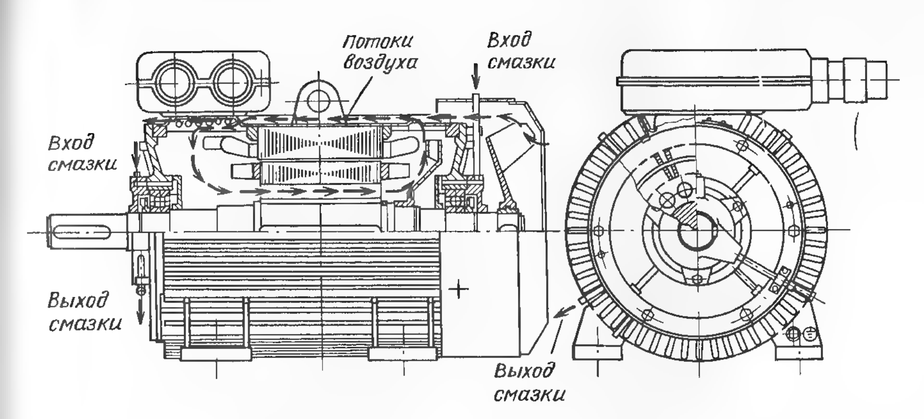


Рис. 8.10. Двигатель с гофрированной станиной

собой охладитель типа воздух–воздух (рис. 8.10). Такое охлаждение значительно эффективнее, чем обычное, принятое для меньших высот оси вращения.

8.6. ВВОДНЫЕ УСТРОЙСТВА

В СССР АД с высотами оси вращения 45–100 мм в основном изготовляют с тремя выводными концами обмотки статора, по требованию заказчиков эти АД могут изготовляться и с шестью выводными концами. Двигатели высот оси вращения свыше 100 мм имеют шесть выводных концов.

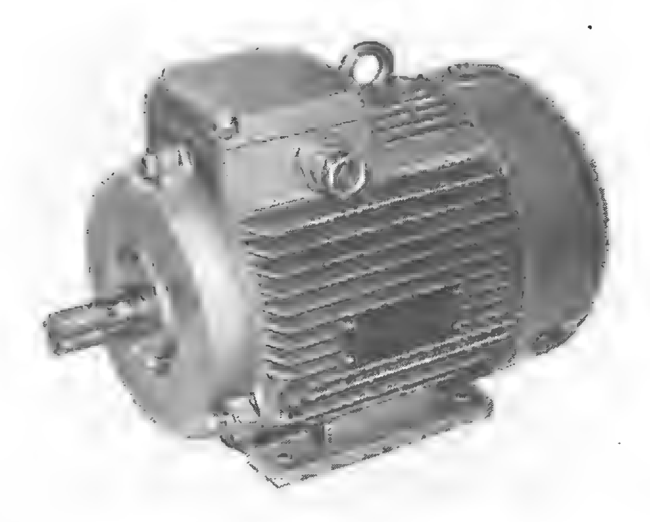

Рис. 8.11. Двигатель АИ80



Рис. 8.12 Двигатель АИ180

Вводные устройства подразделяются на исполнения в зависимости от способа подвода питающего кабеля. Устройства допускают присоединение гибкого металлорукава и кабелей с медными или алюминиевыми жилами с оболочкой из резины или пластмассы. Ввод кабеля может осуществляться через один (рис. 8.11) или два (рис. 8.12) штуцера, а также через удлинитель под сухую разделку или заливку кабельной массой.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ОСНОВНЫЕ МОДИФИКАЦИИ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ АИ

9.1. ДВИГАТЕЛИ ЗАЩИЩЕННОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Согласно СТ СЭВ 247-76 степень защиты IP23 определяется недопустимостью попадания в АД капель воды, падающих под углом не более 60° к вертикали, и предметов диаметром более 12,5 мм. Возможность прямого охлаждения активных частей АД окружающим воздухом создает ряд преимуществ защищенных АД по стоимости, массе, габаритам по сравнению с закрытыми. Эти преимущества особенно сказываются в машинах больших габаритов.

Были проведены исследования для определения оптимальной нижней границы высот оси вращения для АД со степенью защиты IP23.

Анализ полученных результатов показывает, что с уменьшением высоты оси вращения разница в показателях этих АД уменьшается и при "граничных" значениях защищенные и закрытые АД становятся близкими по стоимости, массе и габаритам. На основе результатов исследования

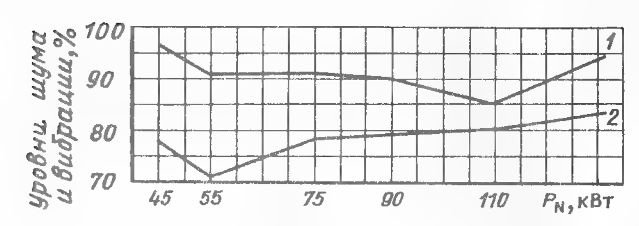


Рис. 9.1. Уровень шума и вибрации АД защищенного исполнения (IP23): *1* – уровень вибрации; *2* – уровень шума

для серии АИ принято, что нижней границей целесообразного применения АД защищенного исполнения является высота оси вращения 200 мм для всех чисел пар полюсов.

Кроме указанных выше преимуществ АД со степенью защиты IP23 имеют лучшие виброакустические характеристики, особенно при двухсторонней радиальной системе вентиляции.

На рис. 9.1 показаны виброакустические характеристики защищенных четырехполюсных АД производства НРБ; уровни шума и вибрации выражены в процентах относительно тех же показателей закрытых АД.

Ряды мощностей и установочных размеров защищенных АД соответствуют рекомендациям МЭК 72. Увязка мощностей с установочными размерами АД серии АИ предусматривает два варианта: Р и С (табл. 9.1 и 9.2).

Таблица 9.1

Условное обозначение установочных размеров	Номинальная мощность, кВт, при частоте вращения, об/мин						Размеры цилиндрического свободного конца вала $d_1 \times l_1$, мм, при частоте вращения, об/мин	
	3000	1500	1000	750	600	500	3000	1500, 1000, 750, 600, 500
200M 200L	55 75	45 55	30 37	22 30	–	–	55×110	60×140
225M	90	75	45	37	–	–	55×110	65×140
250S 250M	110 132	90 110	55 75	45 55	– –	– –	65×140	75×140
280S 280M	160 200	132 160	90 110	75 90		– –	70×140	80×170
315S 315M	– 250	200 250	132 160	110 132	75 90	55 75	75×140	90×170
355S 355M	315 400	315 400	200 250	160 200	110 132	90 110	85×170	100×210

Таблица 9.2

Условное обозначение установочных размеров	Номинальная мощность, кВт, при частоте вращения, об/мин				Размеры цилиндрического свободного конца вала $d_1 \times l_1$, мм, при частоте вращения, об/мин	
	3000	1500	1000	750	3000	1500, 100, 750
200M 200L	45 55	37 45	22 30	18,5 22	60×140	60×140
225M	75	55	37	30	60×140	65×140
250S 250M	90 110	75 90	45 55	37 45	65×140	75×140
280S 280M	– 132	110 132	75 90	55 75	65×140	80×170
315S 315M	160 200	160 200	110 132	90 110	70×140	90×170
355S 355M	250 315	250 315	160 200	132 160	70×140	90×170

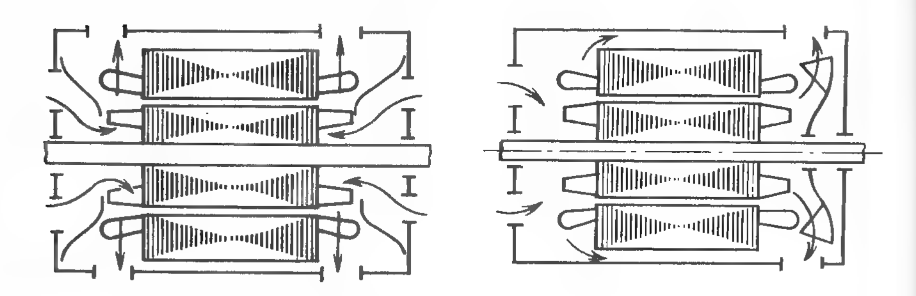


Рис. 9.2. Схема двухсторонней радиальной вентиляции

Рис. 9.3. Схема аксиальной вентиляции

Основная модификация защищенных АД – это АД с фазным ротором. Кроме того, предусмотрены модификации: на частоту тока 60 Гц и со встроенной температурной защитой.

В защищенных АД используются следующие основные системы вентиляции: двухсторонняя радиальная, аксиальная (рис. 9.2, 9.3) и комбинированная.

На основе изучения систем вентиляции, использованных в современных защищенных АД, и их конструктивного решения можно составить классификацию систем (рис. 9.4). Применение той или иной системы вентиляции зависит не только от ее эффективности, но и от ряда

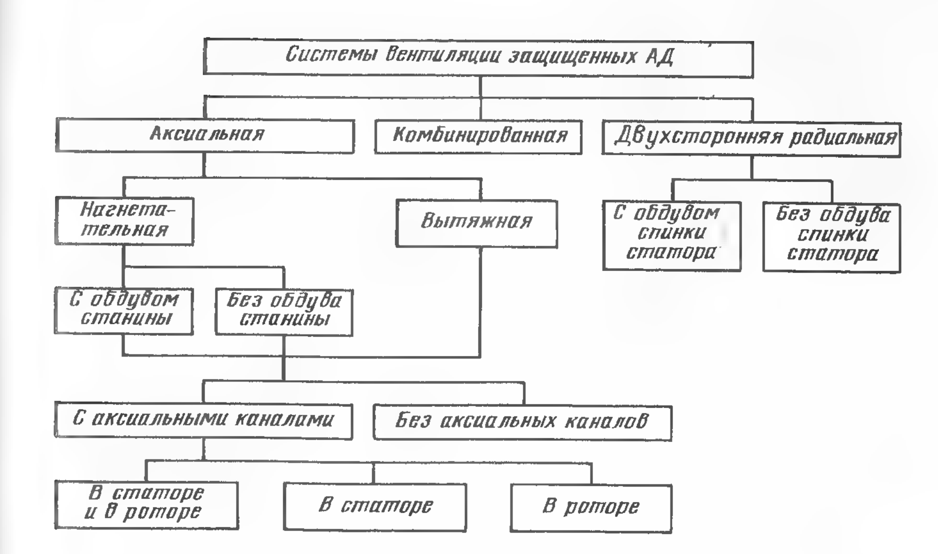


Рис. 9.4. Классификация систем вентиляции защищенных АД (IP23)

технологических, организационно-производственных и эксплуатационных факторов.

В результате проведения сравнительных экспериментальных испытаний и анализа результатов установлено, что двухсторонняя радиальная система вентиляции с обдувом спинки сердечника статора по сравнению с аксиальной вытяжной системой вентиляции имеет следующие преимущества: большую эффективность, меньшие вентиляционные потери, лучший КПД, уменьшенную массу, отсутствие дополнительного вентилятора, более низкие уровни шума и вибрации. Поэтому в унифицированной серии АИН принята как основная двухсторонняя симметричная радиальная система вентиляции с обдувом спинки сердечника статора.

Так как у защищенных АД теплосъем осуществляется, главным образом, через лобовые части обмотки статора, то увеличение длины сердечника статора ведет к относительному ухудшению теплоотдачи, так как пазовая часть обмотки увеличивается по сравнению с лобовой частью. Очевидно, что для каждого АД существует длина статорного сердечника, соответствующая предельно допустимой температуре, принятой для изоляционной системы. Эта длина называется "критической" для данного АД.

Физический смысл существования критической длины сердечника заключается в следующем: при отсутствии радиальных каналов в магнитопроводе машины пазовая и лобовая части обмотки статора охлаждаются в значительной степени неодинаково. Как уже упоминалось, основной теплосъем происходит с лобовых частей, так как эти части обмотки непосредственно охлаждаются воздушным потоком при максимально воз-

можной его скорости. Пазовая часть статорной обмотки окружена нагретым собственными потерями сердечником с одной стороны и нагретым ротором с другой. Поэтому пазовая часть обмотки имеет температуру, значительно превышающую температуру ее лобовых частей. Основная часть теплового потока отводится в лобовые части и отсюда передается охлаждающему воздуху.

Исследованиями установлено, что критическая длина сердечника зависит от класса нагревостойкости изоляционной системы, удельной тепловой нагрузки обмотки, интенсивности охлаждения лобовых частей обмотки статора и ротора.

Критическую длину можно увеличить повышением класса нагревостойкости изоляционной системы, уменьшением удельной тепловой нагрузки обмотки, увеличением коэффициента теплоотдачи с лобовых частей, повышением эффективности охлаждения сердечника статора и ротора. Влияние потерь на температуру обмотки статора имеет важное значение для выбора оптимальных соотношений потерь при проектировании АД.

Поскольку теплопередача в защищенных АД значительно отличается от теплопередачи в закрытых АД, коэффициенты при определении температуры обмотки методом эквивалентных греющих потерь будут иметь другие значения, т.е.

$$\Theta = K(P_{c1} + k_p P_{c2} + k_c P_{Fe}), \tag{9.1}$$

где K – главное термическое сопротивление; P_{c1}, P_{Fe} – потери в роторе и в стали; k_p, k_c – коэффициенты влияния потерь в роторе и в стали.

Известно, что коэффициенты k_p и k_c для закрытых АД приближенно равны 0,4 и 0,6, а для защищенных АД – 0,27 и 0,42.

Уменьшение коэффициентов влияния объясняется непосредственным охлаждением ротора и обдувом спинки сердечника статора.

Роторные лопатки являются одним из самых существенных элементов, особенно при двухсторонней радиальной системе вентиляции, так как в этом случае они являются единственным источником избыточного давления. Особенность их проектирования и оптимизации заключается в том, что они отливаются вместе с короткозамыкающими кольцами и действуют как в качестве вентиляторов, так и в качестве радиаторов, отводящих часть теплоты, выделяющейся в роторе.

Тепловой поток, проходящий через лопатку и отводимый ею, определяют по формуле

$$W = 2\alpha c \Theta_0 L \operatorname{th}\frac{l}{L}\ , \tag{9.2}$$

где α – коэффициент теплоотдачи; c – высота лопатки; Θ_0 – превышение температуры основания лопатки над температурой охлаждающего воздуха; l – длина лопатки; L – параметрическая длина лопатки.

Исследования показали, что длина лопатки, определенная по (9.2), больше оптимальной, определенной с учетом ее действия в качестве и вентилятора, и радиатора. Экспериментально установленный коэффициент коррекции длины лопатки составляет в среднем 0,9.

Защищенные АД в большинстве случаев изготовляют на тех же заводах, где и закрытые АД. Поэтому необходима максимально возможная унификация АД. Обычно унифицируют листы статора и ротора, а также отлитые вместе с клеткой ротора и короткозамыкающими кольцами вентиляторы. Это создает дополнительные требования при проектировании и оптимизации магнитной цепи защищенных АД. В зависимости от количества производимых АД необходимо отдать предпочтение "интересам" одного или другого вида АД. Практика показывает, что до высоты оси вращения 250 мм в производстве преобладают закрытые двигатели, начиная с 280 мм соотношение меняется и при высотах оси вращения больше 280 мм преобладают защищенные АД.

Из конструктивных узлов обычно унифицируют вводные устройства и иногда подшипниковые щиты. Некоторые фирмы [например, ASEA (Швеция)] унифицируют станины, вентиляторы и кожухи, используя аксиальную систему вентиляции.

В серии АИ защищенные АД разработаны в основном с унификацией поперечной геометрии магнитопровода с закрытыми АД со степенью защиты IP54 (IP44).

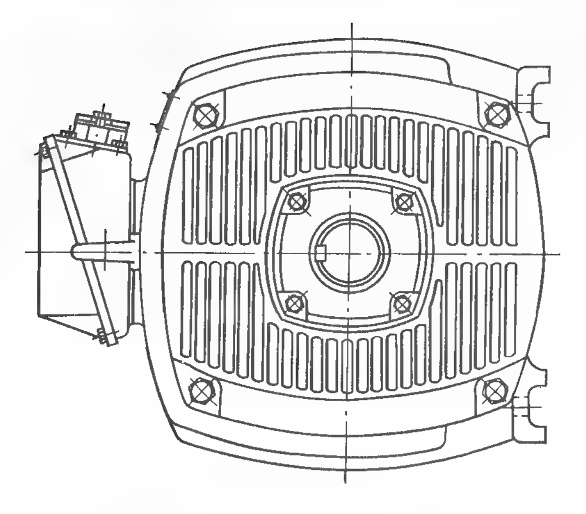
В конструктивном отношении серия защищенных АД разработана в одном основном и двух дополнительных вариантах АД с высотой оси вращения 280–355 мм.

Для основного варианта принята двухсторонняя радиальная симметричная система вентиляции; способ охлаждения – IC01 (рис. 9.5). Форма станины – четырехгранная с дугообразно закругленными гранями. Эта форма соответствует тенденции перехода от круглой формы к прямоугольной; она лучше вписывается в интерьер производственных помещений. Входные отверстия для воздуха расположены на торцах щитов, причем их форма способствует равномерному распределению воздушного потока и направлению его внутрь АД. Степень защиты IP23 обеспечивается жалюзи, отлитыми вместе с подшипниковым щитом. Это конструктивное решение придает стабильность и надежность как щиту, так и решетке.

Жалюзи для выхода воздуха расположены на боковой поверхности станины и отливаются вместе с ней. Допускается отдельное изготовление жалюзи из алюминия или пластмассы.

На внутренней поверхности подшипниковых щитов закреплены воздухонаправляющие диффузоры. Число и размеры лопаток ротора приняты по результатам исследований.

Сердечник статора крепят на аксиальных ребрах, и центр его смещен вниз относительно центра станины, в результате чего поперечное сечение вентиляционных каналов в верхней части АД больше сечения каналов в нижней части.



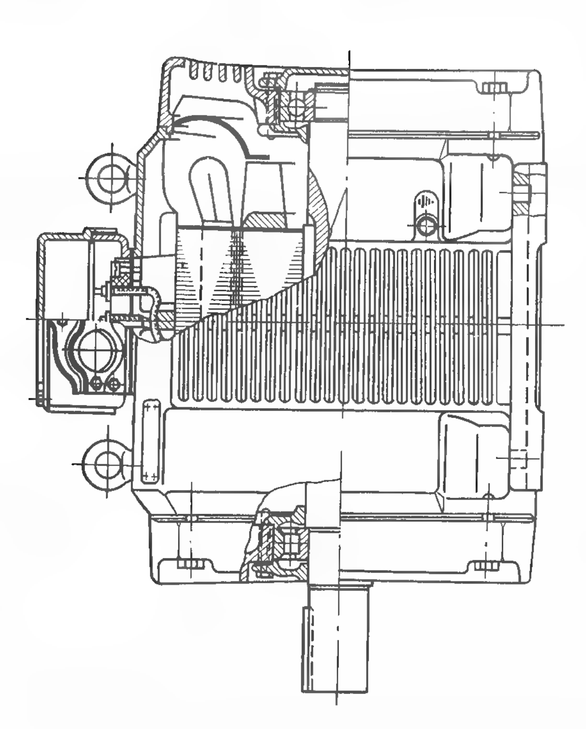


Рис. 9.5. Общий вид защищенного АД (IP23) с двухсторонней радиальной вентиляцией

Аксиальные ребра станины прерывают посредине на длине 50–80 мм. Этим устраняют так называемые "воздушные мешки", которые образуются в области ребер и ухудшают теплоотдачу с поверхности сердечника статора. Охлаждающий воздух входит в окна щитов, проходит вдоль внутренней поверхности диффузоров и лопаток ротора, омывает лобовые части обмотки и выходит из окон станины.

Подшипниковые узлы и вводное устройство такие же, как и у закрытых АД.

Для АД с высотой оси вращения 280–355 мм как вариант предусмотрены сварные конструкции (рис. 9.6). Корпус выполнен в виде полустанины цилиндрической формы. Он представляет собой конструкцию, состоящую из четырех стоек, скрепленных тремя полуцилиндрическими обшивками, двумя ребрами в верхней части и двумя планками в нижней части (лапы). Стойки корпуса имеют кольцевые заточки. На заточках торцевых стоек центрируются подшипниковые щиты, на заточках внутренних стоек – сердечник статора с обмоткой.

Щиты подшипниковые плоские, сварные, имеют четыре торцевых окна для входа охлаждающего воздуха. Для обеспечения необходимой степени защиты к щитам крепят жалюзи из пластика. Верхнюю часть АД закрывают сварным легким кожухом (гнутый стальной лист с выштампованными жалюзи). Кожух устанавливают на кольцевые заточки щита.

Вводное устройство состоит из литого чугунного корпуса и крышки из пластмассы.

Принятая в качестве основного варианта конструкция с радиальной системой вентиляции показала свою эффективность, что позволило при принятых внешних диаметрах сердечников статора достигнуть в габаритах свыше 250 мм повышение мощности на одну и более ступеней по сравнению с предусмотренным для закрытых машин в СТ СЭВ.

Трехфазные АД унифицированной серии со степенью защиты IP23 соответствуют всем рекомендациям Публикаций МЭК. Они выполняются в климатическом исполнении от N2 до N4 по СТ СЭВ 460-77. Номинальный режим работы АД продолжительный S1 по СТ СЭВ 1346-78.

По способу монтажа АД имеют основное исполнение IM1001 по СТ СЭВ 246-76.

Для АД вертикального исполнения допускается исполнение со степенью защиты IP22.

Минимальные значения отношений начального пускового момента к номинальному T_l, минимального момента к номинальному T_u при прямом пуске и максимального момента T_b к номинальному без учета допусков соответствуют указанным в табл. 9.3.

Максимальные допускаемые отношения начальной пусковой мощности к номинальной при прямом пуске P_l без учета допуска составляют:

Номинальная мощность, кВт	До 22	От 22 до 90	Свыше 90
Мощность при пуске P_l, кВ·А	12	11	10

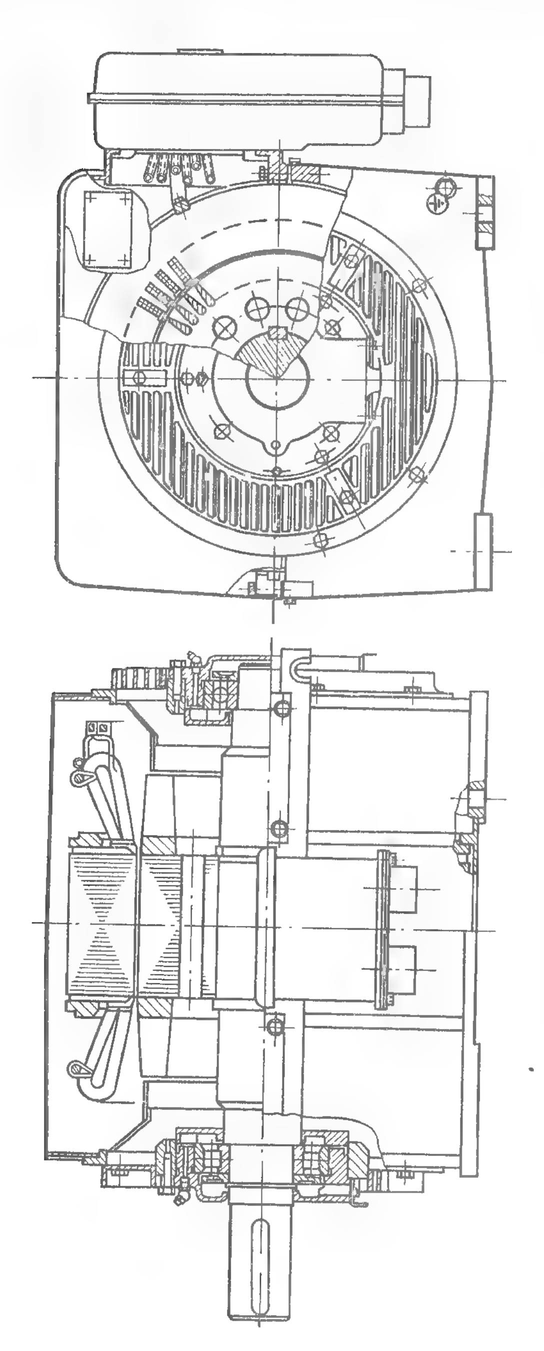


Рис. 9.6. Общий вид защищенного двигателя (IP23) с высотой оси вращения 315 мм со сварной станиной

Таблица 9.3

Номинальная мощность, кВт	Частота вращения (синхронная), об/мин											
	3000			1500			1000			750		
	T_l	T_u	T_b	T_l	T_u	T_b	T_l	T_u	T_b	T_l	T_u	T_b
До 22	–	–	–	–	–	–	1,4	1	1,8	1,2	0,9	1,7
От 22 до 37	–	–	–	1,3	1,0	1,9	1,3	1	1,8	1,2	0,9	1,7
От 37 до 55	1,1	0,8	1,8	1,2	0,9	1,8	1,2	0,9	1,7	1,1	0,8	1,7
От 55 до 90	1	0,7	1,8	1,1	0,8	1,8	1,1	0,8	1,7	1	0,7	1,6
От 90 до 160	0,9	0,7	1,7	1	0,8	1,7	1	0,7	1,7	0,9	0,7	1,6
От 160 до 250	0,8	0,6	1,7	0,9	0,7	1,7	0,9	0,9	1,6	0,9	0,6	1,6
От 250 до 400	0,75	0,6	1,6	0,75	0,6	1,6	0,75	0,6	1,6	0,75	0,6	1,6

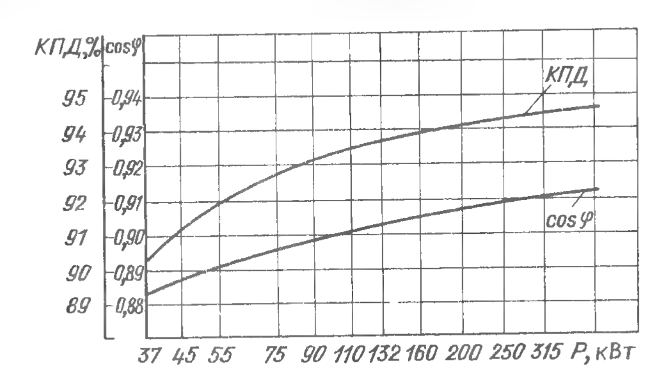


Рис. 9.7. Примерный уровень энергетических показателей защищенных двигателей (IP23) серии АИ

Энергетические показатели (КПД и cosφ) были установлены в процессе разработки исходя из условия минимальных суммарных затрат в производстве и эксплуатации АД. Примерный уровень энергетических показателей АД серии АИ со степенью защиты IP23 при $2p = 4$ показан на рис. 9.7.

Так как оптимизационные расчеты проводились при коэффициенте загрузки по мощности, равном 0,6, то энергетические показатели АД достаточно высоки и при частичных нагрузках. Средний уровень звука АД со степенью защиты IP23 примерно на 5 дБ ниже, чем у закрытых АД.

Максимальные значения виброскорости АД в зависимости от высоты оси вращения приведены ниже:

Высота оси вращения, мм	От 200 до 225	От 250 до 355
Виброскорость, мм/с	2,8	4,5

9.2. ДВИГАТЕЛИ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Двигатели с фазным ротором являются модификацией АД с короткозамкнутым ротором. Главное достоинство таких АД – возможность пуска при малых пусковых токах, что особенно важно для работы от слабых сетей. Кроме того, фазный АД можно регулировать по частоте вращения, вводя в ротор резистор. В ряде случаев фазные асинхронные машины работают в режиме генератора, как нагружающие устройства. Иногда они используются в асинхронном вентильном каскаде, допускающем плавную регулировку частоты вращения в широком диапазоне при высоком коэффициенте мощности.

Выводные концы обмотки ротора, соединенной обычно в звезду, подключены к трем контактным кольцам. С помощью щеток через кольца в цепь обмотки ротора можно вводить добавочный резистор или добавочную ЭДС для изменения пусковых или рабочих свойств машины; щетки позволяют также замкнуть обмотку накоротко.

В большинстве случаев добавочный резистор вводится в обмотку ротора только для облегчения пуска АД, так как в этом случае увеличивается момент и уменьшается ток. При работе АД пусковой резистор должен быть полностью выведен, а обмотка ротора замкнута накоротко.

Таблица 9.4

Условное обозначение установочных размеров	Номинальная мощность двигателей, кВт, при $2p$, равном					
	4	6	8	4	6	8
	АИРФ			АИРНФ		
100S	2,2	–	–	–	–	–
100L	3	1,5	–	–	–	–
112M	4	2,2; 3	–	–	–	–
132S	5,5	4	–	–	–	–
132M	7,5	5,5	–	–	–	–
160S	11	7,5	5,5	–	–	–
160M	15	11	7,5	–	–	–
180M	18,5	15	11	–	–	–
200M	22	18,5	15	37	22	18,5
200L	30	22	18,5	45	30	22
225M	37	30	22	55	37	30
250S	45; 55	37; 45	30; 37	75; 90	45; 55	37; 45
250M	75	55	45	110	75	55
280S	90	75	55	132	90	75
280M	110	90	75	160	110	90
315S	132	110	90	200	132	110
315M	160	132	110	250	160	132
355S	200	160	132	315	200	160
355M	250	200	160	400	250	200

Таблица 9.5

Условное обозначение установочных размеров	Номинальная мощность двигателей, кВт, при $2p$, равном					
	4	6	8	4	6	8
	АИСФ			АИСНФ		
112M	2,2; 3	1,5; 2,2	–	–	–	–
132M	4; 5,5	3; 4	–	–	–	–
160M	7,5	5,5	–	–	–	–
160L	11	7,5	5,5	–	–	–
180L	15	11	7,5	–	–	–
200L	18,5; 22	15	11	37	22	18,5
225M	30	18,5; 22	15; 18,5	45; 55	30; 37	32; 30
250S	–	–	–	–	45	37
250M	37; 45	30; 37	22; 30	75; 90	55	45
280S	55	45	37	110	75	55
280M	75	55	45	132	90	75
315S	90	75	55	160	110	90
315M	110	90	75	200; 250	132; 160	110; 132
315L	–	–	–	315	200	160
355S	132	110	90	–	–	–
355M	160	132	110	–	–	–
400S	200	160	132	–	–	–
400M	250	200	160	–	–	–

Двигатели с фазным ротором выполняются с теми же степенями защиты, что и АД с короткозамкнутым ротором, – IP54 (IP44) и IP23 по СТ СЭВ 247-76.

В серии АИ на базе вариантов АИР, АИС, АИРН, АИСН разработаны соответственно следующие модификации АД с фазным ротором: АИРФ– со степенью защиты IP54 (IP44); АИСФ – IP54 (IP44); АИРНФ – IP23; АИСНФ – IP23.

Связь рядов мощностей и установочных размеров для серий АИРФ и АИРНФ приведена в табл. 9.4, а для серий АИСФ и АИСНФ – в табл. 9.5. Из таблиц видно, что в большинстве случаев невозможно достигнуть одинаковых мощностей АД с фазным и короткозамкнутым роторами. Обмотки фазных роторов АД выполняются всыпными или стержневыми.

Всыпные обмотки – обычные петлевые трехфазные двухслойные равнокатушечные обмотки с укороченным шагом. Число пазов ротора z_2 должно отличаться от числа пазов статора. При расчете задаются обычно числом пазов на полюс и фазу ротора $q_2 = q_1 \pm k$, тогда $z_2 = z_1 q_2/q_1$. В большинстве случаев $k = 1$ или $k = 1/2$. Рекомендуются следующие шаги обмотки y_2:

Таблица

q_2	2	3	4		5		6	
y_2	5	7	9	10	11	12	13	14
k_{w2}	0,933	0,902	0,885	0,925	0,874	0,91	0,876	0,898

Обычно роторы со всыпными обмотками проектируют так, чтобы линейное напряжение на контактных кольцах при соединении обмоток фаз в звезду было около 380 В, поэтому коэффициент трансформации $k_т$ равен или близок к единице.

Всыпные обмотки имеют ряд достоинств, из-за которых им отдается предпочтение в АД мощностью до 55 кВт:

возможность повышения напряжения на кольцах ротора до линейного напряжения статора и соответственно снижение тока ротора, вследствие чего улучшаются условия работы узла контактных колец и повышается надежность машины;

возможность уменьшения числа пазов ротора, вследствие чего уменьшается расход изоляционных материалов и упрощается изготовление штампов;

простота изготовления, возможность механизации укладки аналогично якорным обмоткам машин постоянного тока.

С увеличением размеров АД уменьшается число витков в обмотке статора. Соответственно должно уменьшаться и число витков обмотки ротора, чтобы сохранилось напряжение на контактных кольцах, поэтому в АД средней и большой мощности катушечную обмотку ротора заменяют стержневой. Стержневую обмотку ротора, как правило, выполняют волновой, так как в волновой обмотке меньше межгрупповых соединений, которые технологически трудно выполнимы при большом сечении проводников.

В каждый паз закладывают два заранее изолированных стержня. В лобовых частях стержни отогнуты, как показано на рис.9.8. Шаг между соединяемыми стержнями со стороны контактных колец называется передним ($y_п$), а с противоположной стороны – задним ($y_з$). Сумма переднего и заднего шагов составляет двойное полюсное давление.

Передний шаг $y_п = y_з = 3q$ при q, равном целому числу; $y_п = y_з + 1 = 3q + 0,5$ при q, равном целому числу +0,5. Чтобы не замкнуть обмотку после обхода окружности ротора, последний в каждом обходе шаг $y_{п,к}$ делают укороченным и равным $y_з - 1$ при q, равном целому числу, и $y_{п,к} = y_з$ при q, равном целому числу +0,5.

Сделав q обходов в одну сторону при целом q и $q + 1$ обходов в одну сторону при q, равном целому числу +0,5, соединяют между собой два нижних стержня и делают q или $q - 0,5$ обходов в обратную сторону.

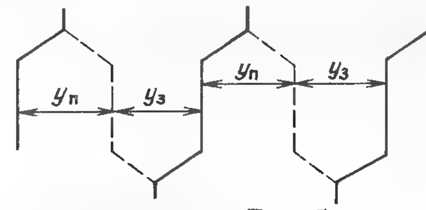


Рис. 9.8. Стержневая обмотка фазного ротора

Шаг при промежуточном соединении стержней равен $y_п$. Так образуется каждая обмотка фазы ротора.

Расчет обмотки фазного ротора проводят в следующей последовательности.

Для определения числа витков в фазе роторов с катушечной обмоткой предварительно задаются ЭДС фазы E_2. Число витков в фазе

$$w_2 = \frac{E_2}{4k_В k_{w2} f_2 Ф} = \frac{E_2}{k_E U_{1N}} \frac{f_1}{f_2} w_1 \frac{k_{w1}}{k_{w2}}. \quad (9.3)$$

Так как E_2 выбрана приближенно и может быть несколько изменена, то, принимая отношение обмоточных коэффициентов $k_{w1}/k_{w2} = 1$, $k_E = 1$ и учитывая, что $s = 1$ и отношение $f_1/f_2 = 1$, получаем

$$w_2 = E_2 w_1 / U_{1N}; \quad (9.4)$$

число эффективных проводников в пазу

$$N_{п2} = 2w_2 m_2 / z_2 = w_2 / (p_2 q_2) \quad (9.5)$$

должно быть четным, поэтому полученное значение округляют, после чего уточняют число витков в фазе:

$$w_2 = p_2 q_2 N_{п2}. \quad (9.6)$$

В роторах с двухслойной стержневой обмоткой $N_{п2} = 2$, поэтому w_2 определяют без предварительного выбора E_2:

$$w_2 = 2p_2 q_2 = z_2 / m_2. \quad (9.7)$$

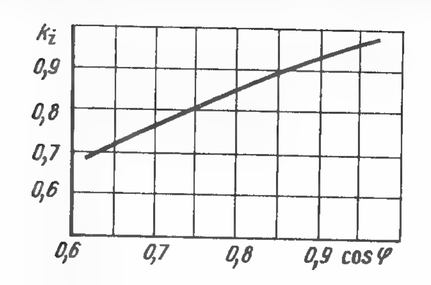
После расчета w_2 необходимо проверить напряжение на кольцах ротора, равное при соединении обмотки ротора в звезду, В,

$$U_k = \sqrt{3}\, k_E U_{1N} w_2 k_{w2} / (w_1 k_{w1}). \quad (9.8)$$

В АД со стержневой обмоткой ротора U_k обычно не превышает 800–1000 В. Для снижения U_k обмотку ротора иногда выполняют с двумя параллельными ветвями, при этом обмотка симметрична только при целом числе q_2.

Предварительное значение тока в обмотке фазного ротора, А,

$$I_2 = k_i I_1 w_1 k_{w1} / (w_2 k_{w2}), \quad (9.9)$$



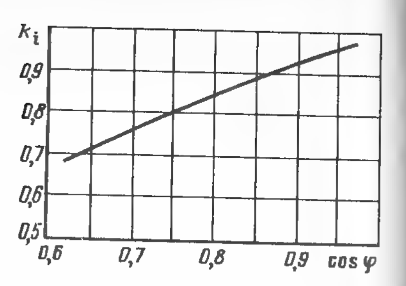


Рис. 9.9. Зависимость коэффициента k_i от номинального значения $\cos\varphi$

Рис. 9.10. Конструкция двигателя с фазным ротором (высота оси вращения 160 мм, исполнение IP54)

где k_i – коэффициент, учитывающий влияние тока идеального холостого хода и сопротивлений обмоток на отношение I_1/I_2. Его приближенное значение может быть принято по кривой на рис. 9.9 в зависимости от предварительного значения $\cos\varphi$, выбранного в начале расчета.

Как и в АД с короткозамкнутым ротором, конструкция АД с фазным ротором зависит от степени защиты. При обеих основных степенях защиты (IP54 и IP23) сохраняется принцип унификации с основным исполнением.

Охлаждение АД серии АИСФ и АИРФ со степенью защиты IP54 осуществляется вентилятором наружного обдува (рис. 9.10, 9.11). Контактные кольца расположены внутри оболочки со стороны выступающего конца вала. Применены два вида роторных обмоток: всыпная для АД с

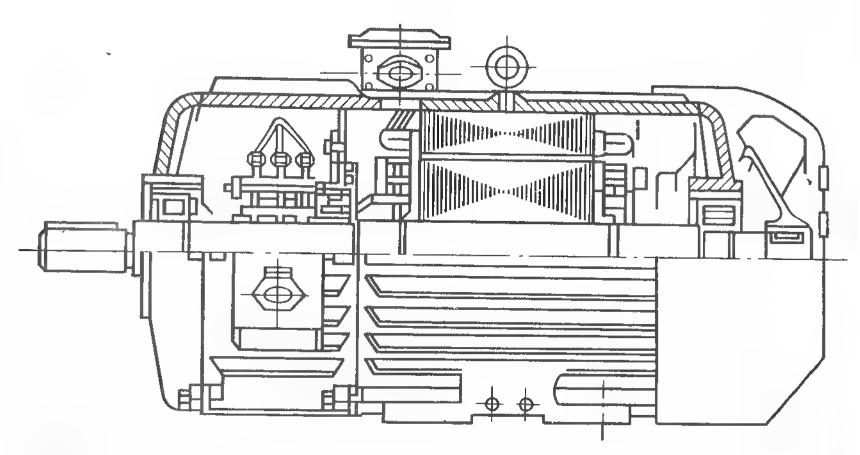


Рис. 9.11. Конструкция двигателя с фазным ротором (высота оси вращения 200 мм, исполнение IP54)

высотами оси вращения до 200 мм по варианту Р и 225 мм по варианту С и стержневая для АД с высотами оси вращения 225 мм и выше. Лобовые части обмотки ротора для предотвращения деформаций от центробежных сил крепятся бандажом. Для балансировки ротора предусмотрено специальное кольцо. Катушки роторов имеют трапециевидную форму лобовых частей, их укладывают в полузакрытые пазы сердечника ротора. Изоляция паза по конструкции и применяемым материалам аналогична изоляции пазов статора. Стержни обмотки ротора имеют непрерывную изоляцию, накладываемую на пазовую и лобовую части стержня. Система изоляции ротора по нагревостойкости соответствует классу В или F.

Таблица 9.6

Высота оси вращения, мм	q_2 при $2p$, равном				
	4	6	8	10	12
160	3	2	1,5	–	–
180–200	3	3	2	–	–
225	5,5	4,5	3,5	–	–
250–355	6	4,5	3,5	3,5	3

Числа пазов на полюс и фазу ротора q_2, принятые в АД с фазным ротором серии АИ приведены в табл. 9.6.

Узел контактных колец АД с высотой оси вращения до 250 мм состоит из опрессованных пластмассой контактных колец *1* с токоотводами. На торцах пластмассовой части каждого кольца расположены вентиляционные лопатки *2*, обеспечивающие засасывание охлаждающего воздуха через отверстия *3* в пространство между кольцами (рис. 9.12).

В АД с высотами оси вращения 280–355 мм применена консольная конструкция контактных колец (рис. 9.13).

На рис. 9.14 показан двигатель с фазным ротором и радиальной системой вентиляции. Конструкция максимально унифицирована с защищенным двигателем с короткозамкнутым ротором. Введены дополнительные центробежные вентиляторы с двух сторон сердечника ротора. На рис. 9.15 представлена конструкция двигателя с аксиальной системой вентиляции.

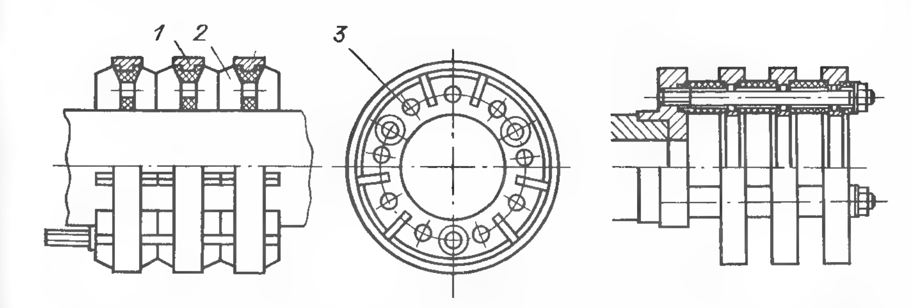


Рис. 9.12. Контактные кольца двигателей с высотами оси вращения 160–250 мм

Рис. 9.13. Контактные кольца двигателей с высотами оси вращения 280–355 мм

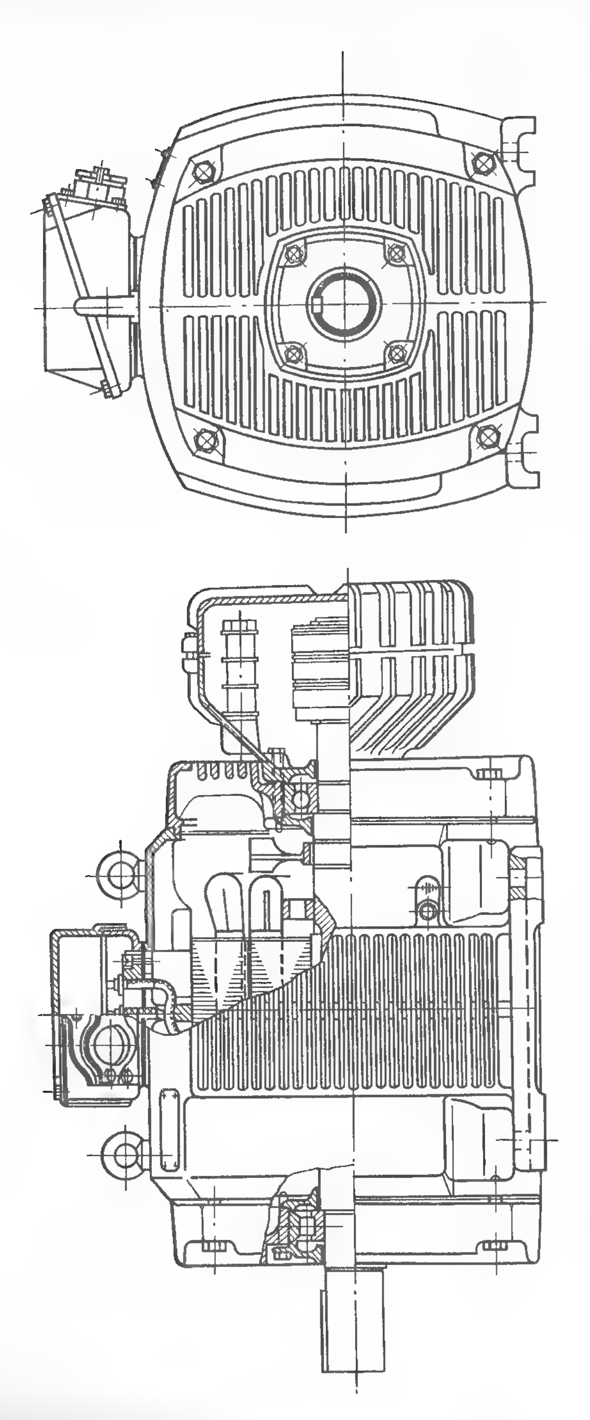


Рис. 9.14. Двигатель с фазным ротором (исполнение IP23) и радиальной системой вентиляции

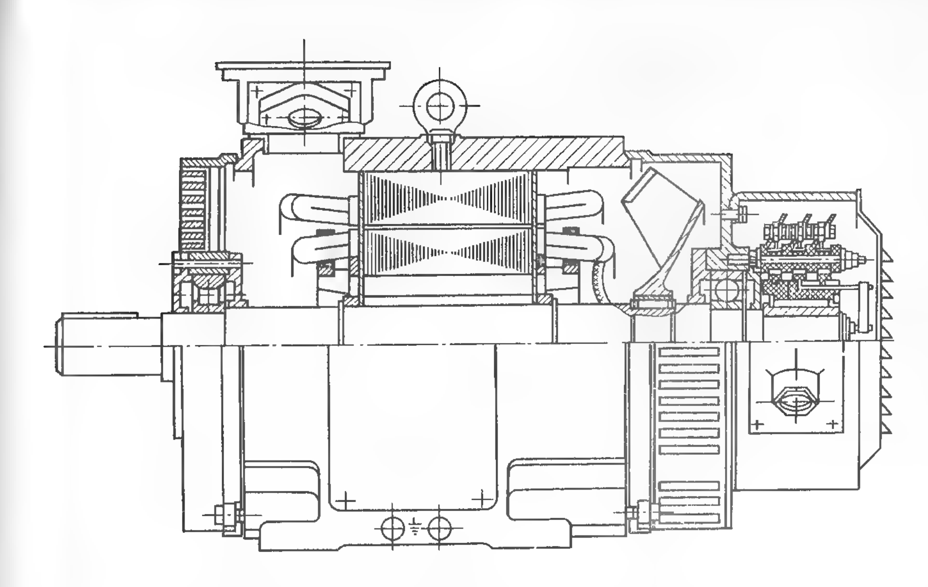


Рис. 9.15. Двигатель с фазным ротором (исполнение IP23) и аксиальной системой вентиляции

В современных электрических машинах применяются прессованные щетки из угольных и графитовых порошков с прибавлением меди. Щетки разных марок различают по твердости, электрической проводимости, коэффициенту трения и плотности. Наибольшее распространение получили медно-графитовые и электрографитированные щетки. Размеры и свойства щеток стандартизованы. Все щетки изготовляют с медными плетеными токоведущими канатиками, которые затем прикрепляют к щеткодержателям.

Для направления и нажатия щеток на контактные кольца служат щеткодержатели, которые имеют большое количество конструктивных разновидностей. Наиболее распространены радиальные щеткодержатели (рис. 9.16) и щеткодержатели нажимного типа (рис. 9.17). Щеткодержатели укрепляют на пальцах, представляющих собой металлические стержни круглого или прямоугольного сечения, опрессованные пластмассой.

Материалом для колец служат медь и сплавы на ее основе; применяется также сталь или чугун. Чистая медь имеет высокую теплопроводность и значительную коррозионную стойкость, однако обладает недостаточной твердостью, что приводит к износу колец. С этой точки зрения бронзы различных марок значительно превосходят чистую медь. Особенно хорошими свойствами обладают бронзы, содержащие в своем составе бериллий (Be). Эти сплавы имеют повышенные твердость и коррозион-

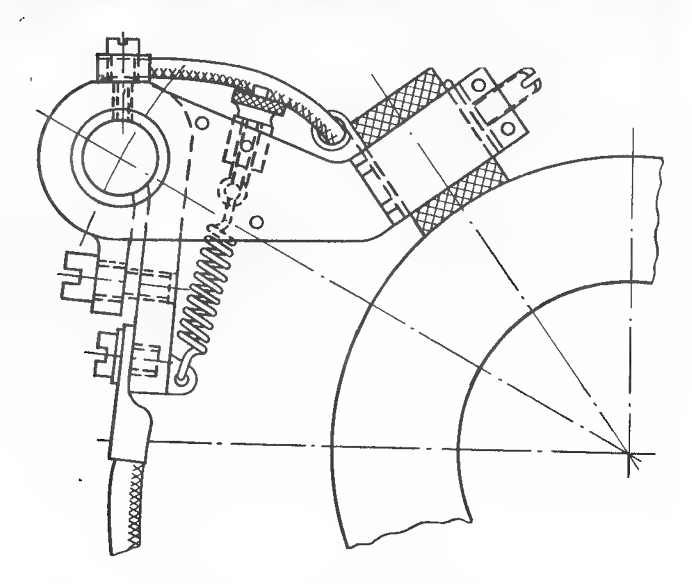


Рис. 9.16. Радиальный щеткодержатель

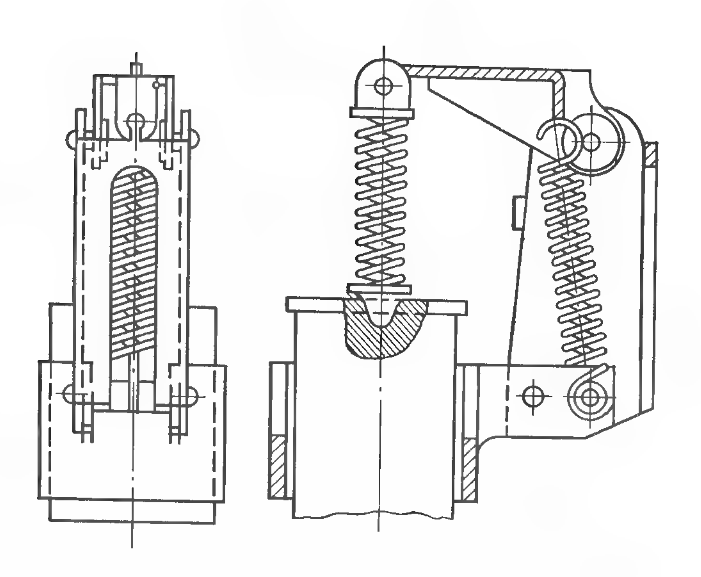


Рис. 9.17. Щеткодержатель нажимного типа

ную стойкость. Медь и медные сплавы — материалы дефицитные и дорогостоящие, поэтому в ряде случаев, особенно в крупных АД, контактные кольца изготовляют из конструкционной стали.

Контактные кольца из чугуна имеют переходное сопротивление контакта несколько больше, чем медные, но значительно меньше, чем стальные. Потери на трение щеток на медных кольцах наибольшие, на стальных и чугунных они почти одинаковы.

Возможны следующие виды крепления узла контактных колец: с холодной или горячей прессовкой на втулку; на пластмассе.

Механический расчет определяет напряжение в контактных кольцах от действия центробежной силы. Расчет производят по предельному износу колец, который принимают равным 8 мм для колец диаметром до 100 мм, 12 мм для колец диаметром 100–250 мм и 16 мм для колец диаметром свыше 250 мм. Опасным сечением кольца является сечение, ослабленное отверстием для контактной шпильки.

Центробежная сила, действующая на кольцо, Н,

$$C_{\text{к}} = 11 m_{\text{к}} R_{\text{к}} (n_{max}/1000)^2 \cdot 10^3, \tag{9.10}$$

где $m_{\text{к}}$ — масса кольца, кг; $R_{\text{к}}$ — средний радиус кольца, м; n_{max} — максимальная частота вращения, об/мин.

Напряжение растяжения в опасном сечении, Па,

$$\sigma = C_{\text{к}}/(2\pi S_{\text{к}}), \tag{9.11}$$

где

$$S_{\text{к}} = \left(\frac{D_{\text{из}} - D_{\text{вн}}}{2} - d_0\right) b_{\text{к}};$$

$D_{\text{из}}$ — диаметр кольца после износа, м; $D_{\text{вн}}$, d_0 — внутренний диаметр кольца и диаметр отверстия для шпильки, м; $b_{\text{к}}$ — ширина кольца, м.

Напряжение в контактных кольцах, напрессованных на втулку, должно быть рассчитано с учетом натяга при посадке. Допускаемые напряжения не должны превышать 150 МПа для стальных колец и 75 МПа для латунных.

На обмотку при вращении ротора действуют центробежные силы. Для предотвращения перемещения в радиальном направлении лобовые части обмотки должны быть закреплены надежно бандажами, намотанными из стальной магнитной или немагнитной проволоки или стеклобандажной ленты.

Диаметр проволоки для бандажей предварительно выбирают в пределах 0,8–2 мм. Ширина бандажей может достигать 40 мм. Более широкие бандажи следует делить на части или применять укладку в несколько слоев по высоте. Под проволочными бандажами прокладывают миканит толщиной 0,3–0,4 мм.

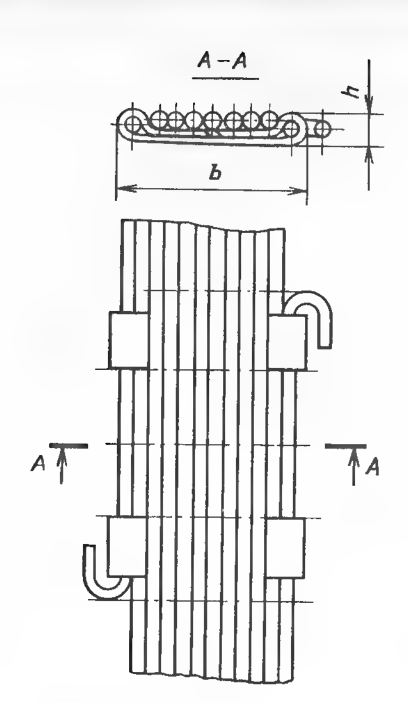


Рис. 9.18. Крепление бандажей ротора

Для укрепления бандажей по ширине применяют скрепки из белой жести шириной 8–15 мм, припаиваемые оловянным припоем (рис. 9.18).

По сравнению с проволочными бандажи из стеклоленты, пропитанной синтетическими смолами, имеют ряд преимуществ: в них не наводятся вихревые токи, не требуется изоляции между бандажом и обмоткой, меньшая трудоемкость в изготовлении.

При расчете бандажей предполагается, что они воспринимают всю центробежную силу, действующую на лобовые части. Если бандаж многослойный, то каждый последующий слой имеет предварительный натяг на 10% меньше предыдущего.

Число витков проволочного бандажа

$$w_б = 1{,}13\,\frac{m_л (D_2 - h_{z2})}{d_б(\sigma_{доп} - \sigma_0)}\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^3, \quad (9.12)$$

где $d_б$ – диаметр проволоки бандажа, м; $\sigma_{доп}$ – допустимое напряжение растяжения, принимаемое для стальной бандажной проволоки 450 МПа; σ_0 – напряжение растяжения от центробежных сил бандажа, Па; n_{max} – максимальная частота вращения, об/мин; $m_л$ – масса лобовой части, кг; h_{z2} – высота паза ротора, м.

Для бандажей из стали напряжение растяжения, Па,

$$\sigma_0 = 2{,}2 D_2^2 (n_{max}/1000)^2 \cdot 10^7.$$

Число витков бандажа из стеклоленты определяют по формуле

$$w_б = 0{,}9\,\frac{m_л (D_2 - h_{z2})}{q_л(\sigma_{доп} - \sigma_0)}\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^3, \quad (9.13)$$

где $q_л$ – площадь поперечного сечения ленты, м^2; $\sigma_{доп}$ – допустимое напряжение растяжения, равное $130 \cdot 10^6$ Па для стеклоленты класса нагревостойкости F.

Для бандажей из стеклоленты напряжение растяжения, Па,

$$\sigma_0 = 0{,}51 D_2^2 (n_{max}/1000) \cdot 10^7.$$

В зависимости от усилий, действующих на клинья, и класса нагревостойкости системы изоляции клинья изготовляют из стеклотекстолита, текстолита, гетинакса. Клин рассчитывают на изгиб и на срез.

Предварительную высоту клина, м, определяют по формуле

$$h_к \geq 1{,}22\sqrt{C' h_к / \sigma_{доп}}. \quad (9.14)$$

Центробежная сила, действующая на пазовую часть обмотки, отнесенная к 1 м длины, равна, Н/м,

$$C' = 5{,}5\, m_п (D_2 - h_{z2})(n_{max}/1000)^2 \cdot 10^3,$$

где $m_п$ – масса пазовой части обмотки, кг.

Допустимое напряжение на изгиб $\sigma_{доп}$ для гетинакса 20 МПа для текстолита 35 МПа.

После определения размеров клиньев по производственным и другим соображениям проводят поверочный расчет. Напряжение на изгиб, Па,

$$\sigma = 1{,}5\, C' b_к / h_к.$$

Напряжения на срез, Па,

$$\sigma_{ср} = 0{,}5\, C' / h_0,$$

где h_0 – высота клина в наиболее опасном сечении; $b_к$ – средняя ширина клина.

Допустимое напряжение на срез $\sigma_{ср}$ для гетинакса 10 МПа, для текстолита 15 МПа.

Двигатели унифицированной серии АИ с фазным ротором предназначены для работы от сети переменного тока частотой 50 Гц в режимах S1, S3, S4 и S8 по СТ СЭВ 1346-78, а также в режиме с регулированием частоты вращения вниз от асинхронной скорости путем введения активного резистора в цепь ротора.

Номинальные данные задаются для режима S1. Климатическое исполнение – N, категория размещения – 3 по СТ СЭВ 460-77.

Двигатели изготовляются в следующих исполнениях по способу монтажа по СТ СЭВ 246-76:

IM10 и IM30 – для АД с высотами оси вращения 100–180 мм;
IM10 – для АД с высотами оси вращения 200–355 мм.

Степень защиты выводного устройства – не ниже IP54.

Уровень шума и вибрационная скорость АД не превышают значений, установленных для короткозамкнутых АД серии АИ.

Напряжение ротора – не более 380 В для АД с высотами оси вращения 100–200 мм и не более 600 В для АД с высотами оси вращения 200–355 мм.

Таблица 9.7

Номинальная мощность, кВт	КПД, % (1500 об/мин)	T_b (1500 об/мин)	КПД, % (1000 об/мин)	T_b (1000 об/мин)	КПД, % (750 об/мин)	T_b (750 об/мин)
1,5	–	–	65	2,5	–	–
2,2	75	2,2	70	2,5	–	–
3	77	2,5	72	2,5	–	–
4	80	2,5	78	2,5	–	–
5,5	82	2,5	81	2,5	80	2,2
7,5	85	2,5	85	2,5	82	2,2
11	86	2,5	86	2,5	85	2,2
15	88	2,5	87,5	2,2	86	2,2
18,5	89	2,5	88	2,5	86,5	2,2
22	89,5	2,5	88,5	2,5	87	2,2
30	90	2,5	89	2,5	88	2,2
37	90,5	2,5	89,5	2,5	89	2,2
45	91	2,5	90	2,5	89,5	2,2
55	91,5	2,5	90,5	2,5	90	2,2
75	92	2,5	91	2,2	90,5	2,2
90	92,5	2,2	91,5	2,2	91	2,2
110	92,5	2,2	92	2,2	91,5	2,2
132	93	2,2	92,5	2,2	92	2,2
160	93,0	2,2	93	2,2	92,5	2,2
200	93,5	2,2	93,5	2,2	–	–
250	93,5	2,2	–	–	–	–

Таблица 9.8

Номинальная мощность, кВт	КПД, % (1500 об/мин)	T_b (1500 об/мин)	КПД, % (1000 об/мин)	T_b (1000 об/мин)	КПД, % (750 об/мин)	T_b (750 об/мин)
18,5	–	–	–	–	85	2,2
22	–	–	87,5	2,2	86	2,2
30	–	–	88	2,2	86,5	2,2
37	88,5	2,5	88,5	2,2	87,5	2,2
45	89	2,5	89	2,2	88,5	2,2
55	89,5	2,5	89,5	2,2	89,5	2,2
75	90	2,5	90	2,2	90	2,2
90	90,5	2,5	90,5	2,2	90,5	2,2
110	91	2,5	91	2,2	91	2,2
132	91,5	2,5	91,5	2,2	91,5	2,2
160	92	2,2	92	2,2	92	2,2
200	92,5	2,2	92,5	2,2	92,5	2,2
250	93	2,2	93	2,2	–	–
315	93,5	2,2	–	–	–	–
400	94	2,2	–	–	–	–

Номинальные значения основных параметров АД соответствуют указанным в табл. 9.7 для АД со степенью защиты IP54 и в табл. 9.8 для АД со степенью защиты IP23.

9.3. ДВИГАТЕЛИ С ПОВЫШЕННЫМ СКОЛЬЖЕНИЕМ

Ряд рабочих механизмов (молоты, прессы, ножницы и др.) требуют кратковременных больших вращающих моментов. Для обеспечения более равномерной нагрузки эти рабочие механизмы часто снабжают-ся маховиком.

Таблица 9.9

$2p$	Установочные размеры: АИРС	Установочные размеры: АИСС
2	71А-132М	80А-160М
4	71А-250S	80А-280S
6	71А-250М	80А-280М
8	71В-250S	80В-280S

Таблица 9.10

ПВ или ПН, %	k: S3	k: S6
15	1,25	1,6
25	1,15	1,3
40	1	1,25
60	0,9	1,05

По сравнению с АД общего назначения АД для работы в таких условиях должен иметь большее скольжение. Это позволяет лучше его использовать, так как при нагрузке значительную часть необходимого вращающего момента машина берет от маховика.

Во время перерыва между двумя последовательными высокими нагрузками приводной АД разгоняет маховик приблизительно до синхронной частоты вращения АД с учетом передачи.

Двигатели с повышенным скольжением обычно максимально унифицируют с АД общего назначения серий АИР и АИС и выполняют в установочных размерах, приведенных в табл. 9.9.

Двигатели предназначены для следующих режимов работы:

Продолжительный S1
Кратковременный S2
Повторно-кратковременный S3
Повторно-кратковременный с частыми пусками S4
Перемежающийся S6

Номинальные данные определяют при работе в режиме S3 с относительной продолжительностью включения ПВ = 40%.

Увязка рядов номинальных мощностей и установочных размеров соответствует увязке АД общего назначения. Для других продолжительностей включения в режиме S3, а также для разных продолжительностей нагрузки (ПН) в режиме S6 можно приблизительно определить мощность АД, умножив его номинальную мощность на приведенный в табл. 9.10 коэффициент k.

Для режима S4 с продолжительностью включения ПВ = 15, 25, 40 и 60%, с номинальной мощностью на валу и коэффициентом инерции до 10 допустимое число включений в час определяется путем расчетов или испытаний.

Двигатели могут также работать непрерывно (режим работы S1), при этом мощность АД составляет около 80% номинальной.

Минимально допустимые значения отношений начального пускового T_l, минимального T_u и максимального T_b моментов к номинальному моменту, а также максимально допустимые значения отношения пусковой мощности S_l к номинальной приведены в табл. 9.11.

Таблица 9.11

$2p$	T_l	T_u	T_b	S_l
2	2	1,6	2,2	13
4	2	1,6	2,2	12
6	1,9	1,5	2,1	10
8	1,8	1,5	2	10

Для АД основного исполнения значение критического скольжения не нормируется. Для АД с повышенным скольжением оно должно быть больше 30%.

Критическое скольжение $s_{кр}$ примерно пропорционально сопротивлению обмотки ротора R_2:

$$s_{кр} \sim R_2. \tag{9.15}$$

Следовательно, для обеспечения наибольшей унификации с основным исполнением целесообразно увеличить активное сопротивление ротора, что может быть достигнуто:

применением алюминиевого сплава с уменьшенной удельной электрической проводимостью при сохранении геометрии магнитопровода ротора АД общего назначения;

уменьшением сечения паза ротора при использовании для заливки клетки чистого алюминия.

На практике применяют оба эти метода, однако чаще используют заливку клетки алюминиевым сплавом.

Например, в СССР для заливки клетки ротора АД с повышенным скольжением применяется сплав типа АК10 с удельной проводимостью γ_s = 18,5 МСм/м при температуре t = 20°C или сплав АКМТ с γ_s = = 10 МСм/м.

Без учета влияния температуры на электрическую проводимость материала клетки критическое скольжение АД с обмоткой ротора из сплава АК10 $s_{кр\gamma_s}$ по отношению к скольжению такого же АД, но с обмоткой из чистого алюминия (γ_{Al} = 31 МСм/м)

$$s_{кр\gamma_s} \approx s_{кр\gamma Al} \frac{\gamma_{Al}}{\gamma_s} = s_{кр\gamma Al} \frac{31}{18,5} = 1,65\, s_{кр\gamma Al} \tag{9.16}$$

и из сплава АКМТ

$$s_{кр\gamma s} \approx s_{кр\gamma Al} \frac{31}{10} = 3,1\, s_{k\gamma Al}. \tag{9.17}$$

Полученные значения являются приблизительными, так как не учитывают нагрева клетки, а также некоторого влияния насыщения потоками рассеяния на реактивные сопротивления ротора.

При заливке ротора АД с повышенным скольжением чистым алюминием сечение стержня клетки q_s надо уменьшить по отношению к сечению клетки обычного ротора q_n так, чтобы критическое скольжение $s_{кр\gamma s}$ по отношению к критическому скольжению АД общего назначения $s_{кр\gamma n}$ увеличилось до необходимого значения, т.е.

$$q_s \leqslant q_n \frac{s_{кр\gamma n}}{s_{кр\gamma s}}. \tag{9.18}$$

В отдельных случаях может оказаться целесообразным, чтобы скольжение АД при номинальной нагрузке имело определенное значение (например, в ПНР было выдвинуто требование, чтобы АД с повышенным скольжением имели при номинальной нагрузке $s_n \approx 10\%$). В таком случае кроме изменения сопротивления клетки ротора, определяющего критическое скольжение, необходимо так подобрать число витков обмотки статора, чтобы характеристика $M = f(s)$ имела соответствующий наклон.

Для АД малых мощностей с клеткой из сплава может оказаться необходимым для получения соответствующих требований значений пускового момента (табл. 9.11) увеличение магнитного потока путем уменьшения числа витков в обмотке фазы статора.

9.4. МНОГОСКОРОСТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Многоскоростные АД предназначены для привода механизмов, требующих ступенчатого регулирования частоты вращения. В серии АИ предусмотрены АД на две, три и четыре частоты вращения с соотношением числа полюсов 4:2; 4:6; 8:4; 8:6; 12:6; 6:4:2; 8:4:2; 8:6:4 и 12:8:6:4.

Мощности АД при различном числе полюсов связаны с частотами вращения выражениями:

для двухскоростных АД

$$P_в/P_н = (n_в/n_н)^{\alpha_1}; \tag{9.19}$$

для трехскоростных АД

$$\left.\begin{aligned} P_в/P_с &= (n_в/n_с)^{\alpha_1};\\ P_с/P_н &= (n_с/n_н)^{\alpha_2}; \end{aligned}\right\} \tag{9.20}$$

для четырехскоростных АД

$$\left.\begin{aligned} P_в/P_{с,в} &= (n_в/n_{с,в})^{\alpha_1};\\ P_{с,в}/P_{с,н} &= (n_{с,в}/n_{с,н})^{\alpha_2};\\ P_{с,н}/P_н &= (n_{с,н}/n_н)^{\alpha_3}, \end{aligned}\right\} \tag{9.21}$$

где индексы обозначают следующие частоты вращения: в — высшую, с — среднюю, н — низшую, с,в — среднюю высшую, с,н — среднюю низшую.

Значения показателей степени α_1, α_2, α_3 приведены в табл. 9.12.

Кроме перечисленных в серии предусмотрено исполнение АД для приводов с вентиляторной характеристикой с соотношением чисел пар полюсов 4:2; 8:4; 8:6; для этих машин показатель степени α = 3.

Таблица 9.12

2p	α_1	α_2	α_3
4 : 2	0,3–0,5	–	–
6 : 4 и 8 : 4	0,5–0,8	–	–
8 : 6 и 12 : 6	0,7–1,0	–	–
6 : 4 : 2	0,3	0,8	–
8 : 4 : 2	0,3	1,0	–
8 : 6 : 4	0,6	0,8	
12 : 8 : 6 : 4	0,8	0,4	1,4

Таблица 9.13

Условное обозначение установочных размеров	Мощность, кВт, при 2 p, равном				
	4:2	6:4	8:4	8:6	12:6
56A	0,1/0,14	–	–	–	–
56B	0,14/0,2	–	–	–	–
63A	0,2/0,28	–	–	–	–
63B	0,28/0,45	–	–	–	–
71A	0,45/0,63	0,37/0,5	0,4/0,2	–	–
71B	0,63/0,95	0,5/0,63	0,2/0,3	–	–
80	1,1/1,5	0,63/0,9	0,3/0,55	0,3/0,4	–
90S	1,5/2	0,9/1,3	0,55/0,75	0,4/0,6	–
90L	2/2,5	1,3/1,8	0,75/1,1	0,5/0,8	–
100S	2,5/3,4	1,8/2,1	1,1/1,5	0,8/1,2	–
100L	3,4/4,3	2,5/2,8	1,5/2,2	1,2/1,8	–
112M	4,5/6,3	2,8/4	2,2/3,6	1,8/2,5	1,1/2
132S	6,3/8,5	4/5,5	3/5,3	2,5/3,3	1,5/2,8
132M	8,5/11	5,5/7,5	4/7,1	4/5,5	2,2/4
160S	11/15	7,5/11	6/9	7,5/8,5	3/5,5
160M	15/18,5	11/14	9/13	–	4/7,5
180M	18,5/22	14/17	13/18	11/15	6,7/11
200M	22/30	17/23	17/25	15/18,5	9/14
200L	30/37	23/30	–	18,5/22	10/17
225M	37/45	30/37	22/33	22/30	13/22
250S	45/55	37/45	30/45	30/37	16/28
250M	55/75	45/55	37/55	40/55	18,5/36
280S	75/90	55/63	45/75	55/75	22/40
280M	90/110	63/75	55/90	75/90	28/55
315S	–	–	75/110	–	33/63
315M	–	–	90/132	–	40/75
355S	–	–	110/160	–	50/90
355M	–	–	132/200	–	63/110

Ряды высот оси вращения, ряды мощностей и их взаимная увязка для многоскоростных АД приведены: в табл. 9.13 – для двухскоростных АД с $\alpha_1 = 0{,}3 \div 1$; в табл. 9.14 – для двухскоростных АД с вентиляторной характеристикой; в табл. 9.15 – для трехскоростных АД с $2p = 6{:}4{:}2$ и $2p = 8{:}4{:}2$; в табл. 9.16 – для трехскоростных АД с $2p = 8{:}6{:}4$ и четырехскоростных АД.

Пусковые характеристики – минимальные значения отношений начального пускового, максимального и минимального моментов к номинальному, а также максимальное значение пусковой мощности многоскоростных АИ – приведены в табл. 9.17.

Двухскоростные АД с соотношением чисел пар полюсов 1:2 ($2p = 4{:}2$; $2p = 8{:}4$ и $2p = 12{:}6$) имеют одну полюсно-переключаемую по схеме Даландера обмотку. Соединение фаз – в треугольник на низшей

Таблица 9.14

Условное обозначение установочных размеров	Мощность, кВт, при 2p, равном		
	4:2	8:4	8:6
71A	0,08/0,63	0,06/0,5	–
71B	0,12/0,95	0,09/0,63	–
80	0,2/1,5	0,12/0,9	0,18/0,4
90S	0,25/2	0,18/1,3	0,25/0,6
90L	0,3/2,5	0,25/1,8	0,37/0,8
100S	0,4/3,4	0,3/2,1	0,55/1,2
100L	0,55/4,5	0,37/2,8	0,75/1,8
112M	0,8/6,3	0,55/4	1/2,5
132S	1,1/8,5	0,75/5,5	1,4/3,3
132M	1,4/11	1/7,5	2,2/5,5
160S	1,8/15	1,4/11	3,5/8,5
160M	2,2/18,5	1,8/14	–
180M	3/22	2,2/17	6,3/15
200M	4/30	3/23	7,5/18,5
200L	4,5/37	4/30	9/22
225M	5,5/45	4,5/37	12,5/30
250S	7,5/60	5,5/45	15/37
250M	9,5/75	7/55	22/55
280S	11/90	8/63	30/75
280M	15/110	9,5/75	37/90

Таблица 9.15

Условное обозначение установочных размеров	Мощность, кВт, при 2p, равном	
	6:4:2	8:4:2
80	0,3/0,45/0,5	–
90S	0,5/0,7/0,95	–
90L	0,7/1,1/1,3	0,37/1,1/1,3
100S	1,0/1,5/1,8	0,63/1,5/1,8
100L	1,4/2/2,4	0,9/2/2,4
112M	1,7/2,5/3	1,1/2,5/3
132S	2,8/3,6/4,2	1,8/3,6/4,2
132M	3,8/5/6	2,4/5/6
160S	6,3/7,5/10	5/7,5/10

Таблица 9.16

Условное обозначение установочных размеров	Мощность, кВт, при 2p, равном 8:6:4	12:8:6:4	Условное обозначение установочных размеров	Мощность, кВт, при 2p, равном 8:6:4	12:8:6:4
100S	0,7/0,9/1,3	–	200M	10/13/17	5/8/9/12,5
100L	0,9/1,2/1,5	–	200L	13/17/22	6/10/11/15
112MA	1,1/1,5/1,7	–	225M	17/22/28	7,5/12/13/20
112MB	1,5/2/2,2	–	250S	22/28/33	9/17/18,5/27
132S	2/2,5/3,2	–	250M	28/33/40	12/22/24/30
132M	3/3,5/4,5	–	280S	33/40/50	15/30/32/40
160S	4/5,5/7,5	1,8/4/4,5/6,7	280M	40/50/63	20/40/42/50
160M	5,5/7,5/11	–	315S	50/63/75	–
180M	7,5/10/13	3/5/6/8	315M	63/75/90	–

Таблица 9.17

Соотношение чисел полюсов	Частота вращения	T_l	T_b	T_u
4:2, 6:4, 8:4, 8:6, 12:6	Низшая	1,3	1,8	1
	Высшая	1,05	1,7	0,8
4:2, 8:4, 8:6*	Низшая	1,05	1,7	1
	Высшая	0,9	1,8	0,65
6:4:2, 8:4:2, 8:6:4	Низшая	1,2	1,7	1
	Средняя	1,05	1,7	0,8
	Высшая	1	1,8	0,65
12:8:6:4	Низшая	1,2	1,6	1
	Средняя низшая	1,05	1,6	0,8
	Средняя высшая	0,9	1,7	0,8
	Высшая	0,9	1,8	0,95

*Двигатели для электроприводов с вентиляторной характеристикой момента сопротивления.

Примечание. Отношение пусковой мощности к номинальной S_l = 11.

скорости и в двойную звезду на высшей. Те же машины с вентиляторной характеристикой (2 p = 4:2 и 2 p = 8:4) имеют соединение фаз в звезду на низшей скорости и в двойную звезду на высшей. Обмотки АД с $\alpha \leqslant 1$ и АД для приводов с вентиляторной характеристикой различаются только схемой соединения. В трехскоростных АД предусмотрены две независимые обмотки: одна полюсно-переключаемая по схеме Даландера с числом полюсов 4:2 для АД с 2 p = 6:4:2, 8:4:2 и 8:4 для АД с 2 p = 8:6:4 и одна обычная с числом полюсов, равным 2 p = 6 для АД с 2 p = 6:4:2 и 8:6:4 и 2 p = 8 для АД с 2 p = 8:4:2. Четырехполюсные АД с 2 p = 12:8:6:4 имеют две независимые полюсно-переключаемые по общеизвестной схеме Даландера обмотки с 2 p = 8:4 и 12:6.

Двухскоростные АД с соотношением чисел полюсов 6:4 и 8:6 имеют обмотки, переключаемые по методу амплитудно-фазовой модуляции. Такие обмотки могут быть построены при числе пазов статора 36, 54 и 72. Здесь рассматриваются схемы для 2 p = 6:4 при числе пазов статора 54 и 2 p = 8:6 при числе пазов статора 72.

Обмотка состоит из шести ветвей, соединенных в треугольник или в двойную звезду. Изменение числа полюсов достигается изменением направления токов на противоположное в половине катушечных групп и сохранением направления токов в остальных группах.

Схемы обмоток представлены на рис. 9.19–9.22, где катушечные группы обозначены прямоугольниками с диагональной чертой; цифра под диагональю указывает на число катушек в группе, цифра над диагональю обозначает порядковый номер катушки. Буквами Н и К обозначены начала и концы катушечных групп. Значения обмоточных коэффициентов, полученные из звезды пазовых ЭДС:

при z_1 = 54, 2 p = 4:6 $k_{w(6)}$ = 0,871; $k_{w(4)}$ = 0,651;
при z_1 = 72, 2 p = 8:6 $k_{w(8)}$ = 0,831, $k_{w(6)}$ = 0,806.

Все конструктивные элементы, а также сердечники статора и ротора многоскоростных АД унифицированы с соответствующими базовыми АД основного исполнения. За базу для АД с соотношением чисел 4:2, 6:4:2 и 8:4:2 приняты четырехполюсные АД соответствующих габаритов. Вентиляторы этих АД заимствованы от двухполюсных машин основного исполнения – с уменьшенным диаметром и меньшим числом лопаток.

За базу для АД с соотношением чисел полюсов 6:4, 8:6, 8:6:4 и 12:8:6:4 приняты шестиполюсные АД основного исполнения. За базу для АД с соотношением чисел полюсов 8:4 приняты восьмиполюсные АД основного исполнения.

Соотношения чисел пазов многоскоростных АД приведены в табл. 9.18.

Для повышения пусковых моментов многоскоростные АД с высотами оси вращения 160–250 мм выполнены с двойной беличьей клеткой. Все двухскоростные АД имеют 6 выводных концов, трехскоростные – 9, четырехскоростные – 12.

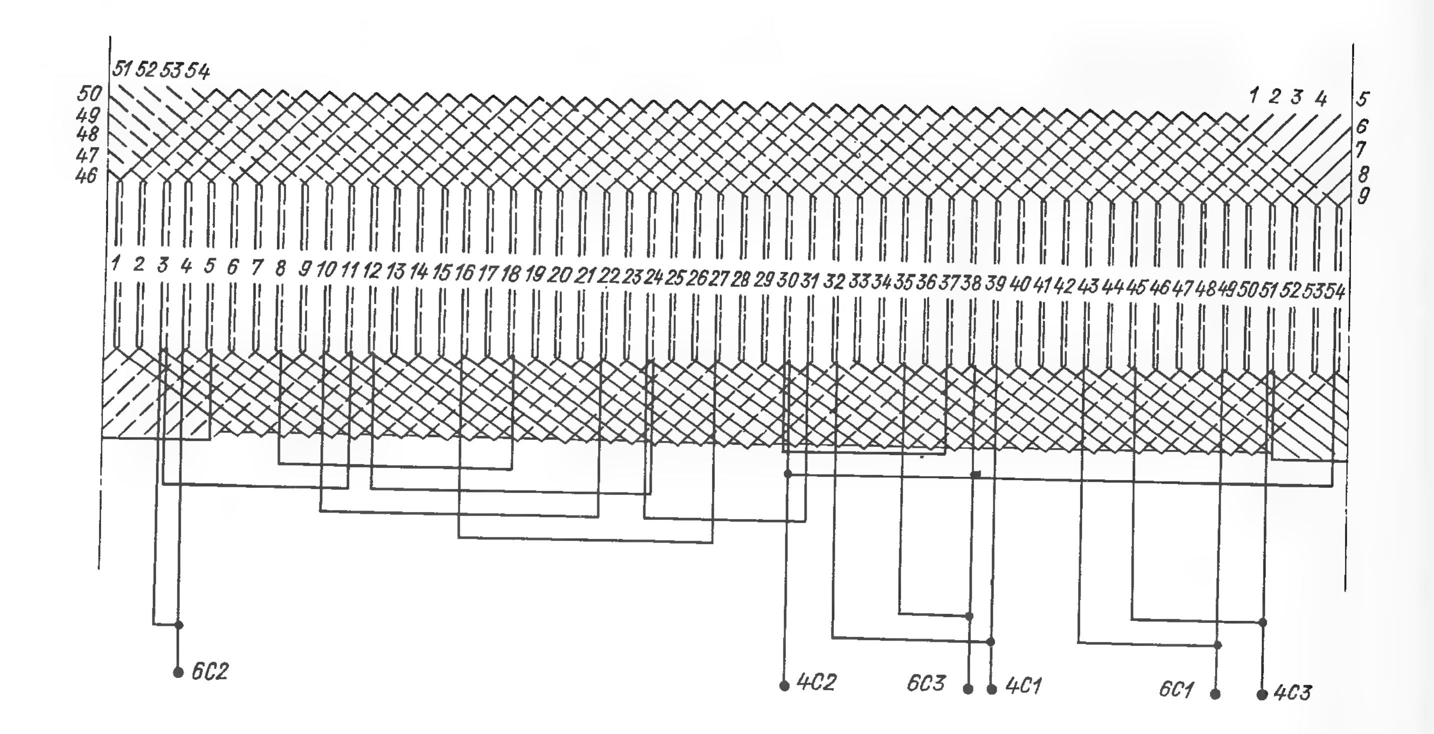


Рис. 9.19. Схема обмотки двухскоростного АД с числом пазов 54 ($2p = 4:6$):

$2p = 6$ – схема соединения обмоток в треугольник, $a = 1$, *6C1, 6C2, 6C3* – питание, *4C1, 4C2, 4C3* – свободны; $2p = 4$ – схема соединения обмоток в звезду, $a = 2$, *4C1, 4C2, 4C3* – питание; *6C1, 6C2, 6C3* – замкнуты

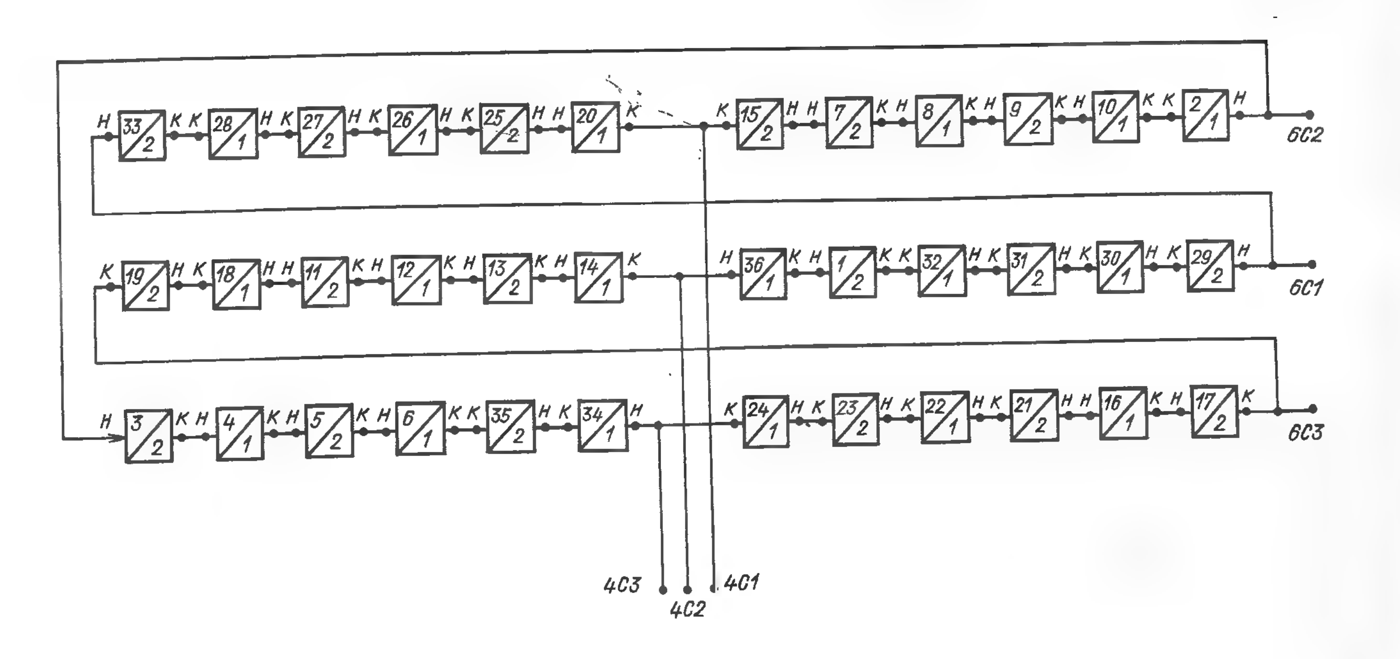


Рис. 9.20. Схема включения катушечных групп обмотки по рис. 9.21

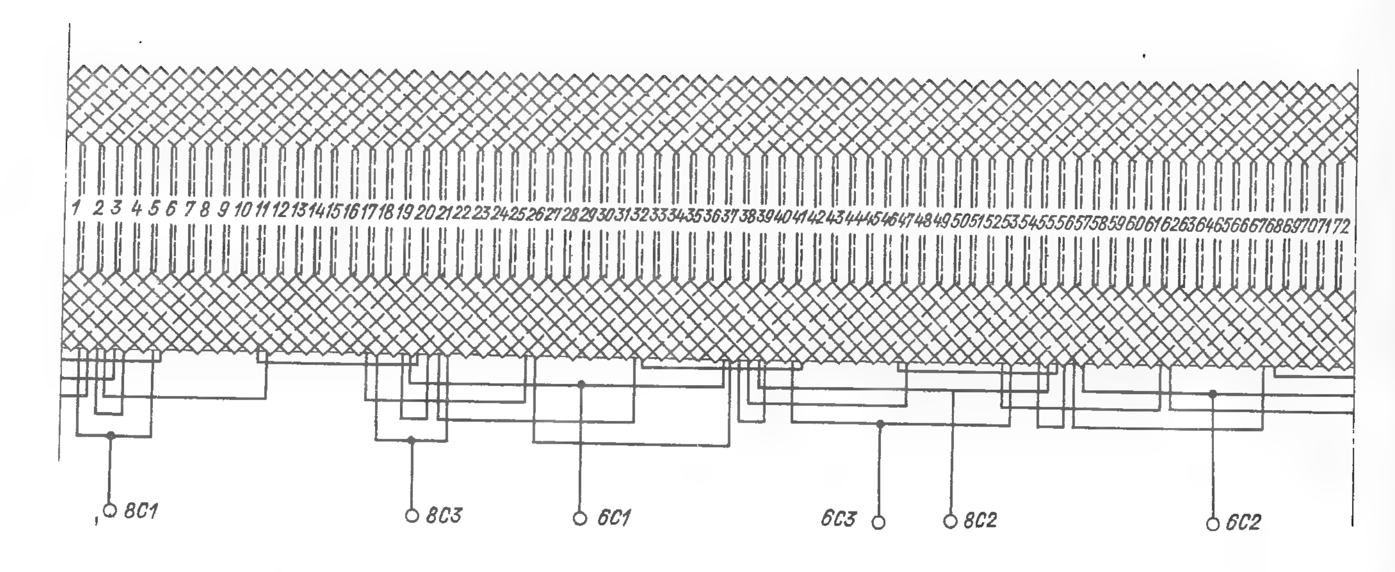


Рис. 9.21. Схема обмотки двухскоростного двигателя с числом пазов 72 ($2p = 8:6$) :

$2p = 8$ – схема соединения обмоток в треугольник, $a = 1$, *8C1, 8C2, 8C3* – питание, *6C1, 6C2, 6C3* – свободные; $2p = 6$ – схема соединения обмоток в звезду, $a = 2$, *6C1, 6C2, 6C3* – питание, *8C1, 8C2, 8C3* – замкнуты

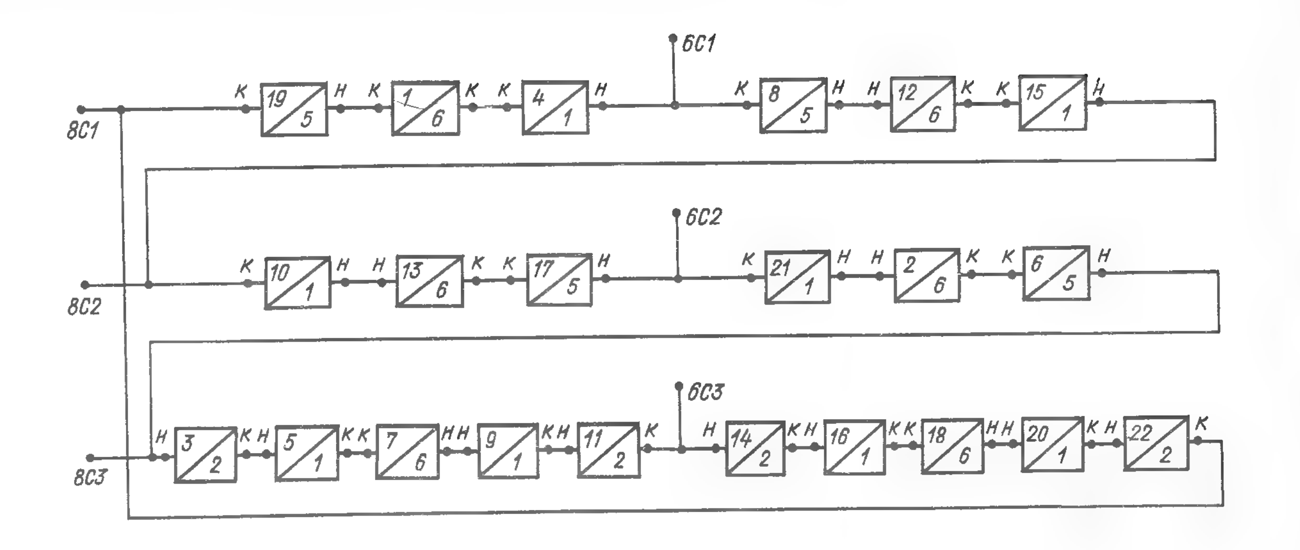


Рис. 9.22. Схема включения катушечных групп обмотки по рис. 9.21

Таблица 9.18

Соотношение чисел полюсов	z_1/z_2 для АД с высотами оси вращения, мм							
	56,63	71	80,90	100	112,132	160	180–225	250
4:2	24/18	24/18	36/28	36/28	36/28	36/28	48/40	60/50
6:4	–	24/18	36/28	36/28	36/28	54/42	72/56	72/56
8:4	–	24/18	36/28	36/28	48/44	48/44	72/68	72/68
8:6	–	–	36/28	36/28	54/42	54/42	72/56	72/56
12:6	–	–	–	–	54/42	54/42	72/56	72/56
6:4:2	–	–	36/28	36/28	36/28	48/40	–	–
8:4:2	–	–	–	36/28	36/28	48/40	–	–
8:6:4	–	–	–	36/28	54/42	54/42	72/56	72/56
12:8:6:4	–	–	–	–	–	54/42	72/56	72/56

9.5. ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЕ ДВИГАТЕЛИ

В последние годы все большее распространение получают системы приводов с широким диапазоном плавного регулирования частоты вращения и с большими перегрузочными способностями. Как известно, наиболее экономичным способом регулирования частоты вращения является частотный, поэтому широкое применение получают частотно-регулируемые электроприводы на базе АД с короткозамкнутым ротором. Такие АД находят применение для привода грузоподъемных механизмов, вентиляторных установок, компрессорных машин, центробежных насосов, металлорежущих станков, сельскохозяйственных машин, специальных технологических установок, прокатных станов и других систем приводов (табл. 9.19).

Работа АД в указанных приводах характеризуется изменяющимися в заданных диапазонах, а часто и по заданным законам значениями n, f или U.

Использование в частотно-регулируемых электроприводах серийных АД приводит к снижению их технико-экономических показателей, поэтому для таких систем целесообразно создание специальных АД в целях снижения их массы, габаритов, стоимости, повышения КПД, надежности, улучшения динамических характеристик, а для ряда установок – возможности размещения электрооборудования и обеспечения заданных показателей.

Условия производства частотно-регулируемых двигателей в основном аналогичны условиям производства АД общего назначения (массовость выпуска, технология, применяемые материалы, система охлаждения), а условия эксплуатации имеют существенные отличия, обусловленные спецификой режимов работы. Рассмотрим эту специфику.

Прежде всего необходимо отметить, что рассматриваемые АД работают от статических преобразователей частоты, форма кривой напряжения которых несинусоидальна, т.е. указанные преобразователи являются

Таблица 9.19

Параметры	Вид приводимых механизмов								
	Грузоподъемные механизмы	Вентиляторные установки	Компрессорные машины	Центробежные насосы	Металлорежущие станки	Сельскохозяйственные машины	Специальные технологические установки	Прокатные станы	Другие механизмы
Номинальная мощность, кВт	20–130	0,27–40	10–1000	100–320	0,5–100	0,4–100	0,1–400	100–500	0,6–400
Пределы регулирования напряжения, В	50–380 50–450	50–380	50–380	0–660	0–660	30–380	0–660	До 380, 1000	50–380
Пределы регулирования частоты, Гц	5–75 50–120	5–60	5–60	30–50	10–150	5–60	0–60	До 50; 100; 200; 400	5–75
Синхронная частота вращения, об/мин, при частоте 50 Гц	1000	750; 1000; 1500; 3000	500; 750; 1000; 1500	1500	6000	1000; 1500; 3000	500; 1000; 750; 1000; 3000	1000; 1500; 3000; 6000	1000; 1500; 3000
Диапазон регулирования частоты вращения:									
вверх от основной	(2,4–1,5) :1	1,2:1	(1.2–1,4) :1	–	1,5:1	1,2:1	(1,2–1,5) :1	–	(1,1–1,5) :1
вниз от основной	10:1	10:1	10:1	1,4:1	10:1	(5–20) :1	(10–30) :1	10:1	10:1
Стабильность работы (точность поддержания частоты вращения) на основной частоте вращения, %	1–2	1,5	1.2	1,2	1,2	0,7–5	1	0,2	1–2

источником высших (а в ряде случаев и низших) временных гармонических. Эти гармоники вызывают дополнительные потери и моменты.

Для повышения производительности механизмов, работающих в интенсивных режимах, необходимо обеспечить минимальное время переходного процесса частотно-регулируемого электропривода при минимальных значениях перерегулирования по току или напряжению. К АД общего назначения, как правило, не предъявляются подобные требования. Частотно-регулируемые АД работают в широком диапазоне изменения частот вращения. Выбор номинальной частоты вращения в этом диапазоне должен удовлетворять условиям получения минимальной массы (или стоимости), габаритов двигателей и в то же время обеспечивать экономичную работу АД во всем диапазоне. Поскольку АД не связан со стандартной частотой сети, в качестве номинальных частоты тока и частоты вращения можно выбрать значения, максимально приближенные к оптимальным (с учетом получения необходимой кратности частот входа и выхода преобразователя частоты, а в ряде случаев — и существующих стандартов).

Определение номинальных значений напряжения, тока и мощности частотно-регулируемого АД производится по заданным диапазонам их изменения. При низких частотах возникают существенные пульсации частоты вращения и момента, что вызывает появление дополнительных требований к параметрам АД и к значениям потерь в обмотках статора и ротора.

Частотно-регулируемые АД в основном работают с различного рода регуляторами напряжения или магнитного потока, которые обеспечивают устойчивую работу АД, поэтому значение перегрузочной способности в ряде случаев может быть снижено.

Следует отметить, что при различных частотах вращения перегрузочная способность АД в зависимости от типа системы вообще должна быть разной. В некоторых системах перегрузочная способность АД при номинальной частоте тока должна быть повышена.

Возможность осуществления частотного пуска АД во многих случаях позволяет избежать работы при скольжениях выше критических. Поэтому значения пускового и минимальных моментов и пускового тока при проектировании АД, как правило, не должны задаваться; последнее обстоятельство способствует выполнению ротора с пазом минимального сопротивления и, следовательно, уменьшению массы и повышению КПД АД. Форма паза также выбирается без учета пусковых характеристик; появляется возможность в ряде случаев отказаться от скоса пазов.

Жесткие требования к выбору номинального скольжения предъявляются в приводах с параллельной работой АД. В приводах с частотным управлением целесообразно применение отдельного преобразователя частоты для каждого из АД. В этом случае никаких требований к значению расчетного скольжения АД не предъявляется, поскольку система автоматического управления обеспечивает нормальное распределение нагрузок, например путем задания отличающихся частот тока для разных АД при различной жесткости их характеристик.

В отличие от АД общего назначения частотно-регулируемые двигатели часто работают при непрерывных изменениях частоты и амплитуды напряжения. В связи с этим необходимо особо учитывать динамические свойства АД.

В связи с тем что АД работает при различных частотах вращения, условия охлаждения различны и особенно неблагоприятны при низких частотах, поэтому целесообразно предусмотреть независимую систему охлаждения.

Рассмотренные особенности работы регулируемых АД определяют и методы их расчета, и конструкцию. При этом, однако, многие положения разработанных методик проектирования электрических машин общего и специального назначения применимы и для рассматриваемых АД. Вместе с тем проектирование регулируемых АД имеет целый ряд особенностей, которые будут рассмотрены ниже.

Существенный интерес представляют характеристики АД при переменной частоте питания, а именно — зависимость полезной мощности P_2 и момента M на валу, тока статора I_1, скольжения s, КПД η, коэффициента мощности $\cos\varphi$ от частоты f_1.

Известно, что характеристики АД зависят от законов регулирования частоты и напряжения статора, которые весьма разнообразны. Целесообразность и реальные возможности технической реализации законов управления также неодинаковы. При выборе закона управления следует учитывать особенности требований к приводам, вид механических характеристик производственных механизмов, особенности преобразователя частоты и т.д. Наиболее часто используются следующие законы управления:

1) классический закон управления

$$\frac{U_1}{U_{1N}} = \frac{f_1}{f_{1N}} \sqrt{\frac{M}{M_N}} \quad \text{при} \quad P_2 = \text{const}; \qquad (9.22)$$

2) закон управления с компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении статора

$$(U_1 - I_1 R_1)/f_1 = \text{const} \quad \text{при} \quad M = \text{const}; \qquad (9.23)$$

3) закон управления при постоянстве напряжения

$$f_1 = \text{var} \quad \text{при} \quad U_1 = U_{1N} = \text{const} \quad \text{и} \quad P_2 = \text{const}. \qquad (9.24)$$

Применение классического закона управления позволяет получить обширный диапазон регулирования частоты вверх от номинальной с практически номинальным значением КПД или даже несколько превышающим его и постоянным $\cos\varphi$. Однако в реальных условиях пределы регулирования ограничиваются механической прочностью машины.

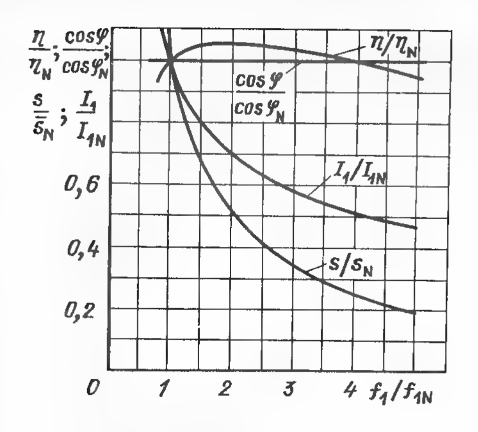
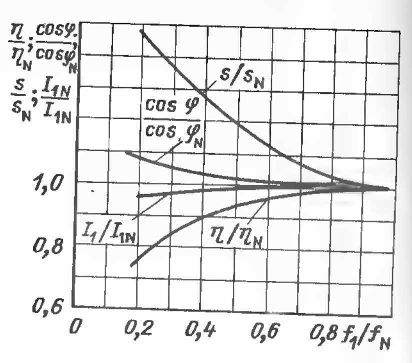



Рис. 9.23. Изменение тока статора, скольжения и энергетических показателей двигателя при законе управления по (922)

Рис. 9.24. То же, что и на рис. 9.25, но при законе управления по (9.23)

Частный случай закона (9.23) U_1/f_1 = const. В этом режиме все характеристики, кроме cos$\varphi = f(f)$, при понижении частоты ухудшаются. Особенно заметным это ухудшение становится начиная от половины номинального значения частоты. Эта граница приблизительна и зависит от параметров АД, главным образом от активного сопротивления статорной обмотки, в известной мере она может быть изменена конструированием машины. Указанный закон управления в области низких частот неэффективен. Поэтому для приводов с глубоким регулированием скорости применяется закон управления с компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении статора.

В режиме $U_1 = U_{1N}$ = const; f = var и P_2 = const фактором, определяющим поведение АД, является снижение потока и возрастание индуктивного сопротивления статора с увеличением частоты, что приводит к уменьшению значения максимального момента.

Типичные характеристики АД при различных управлениях регулирования приведены на рис. 9.23–9.25. Характеристики построены в относительных единицах; за базовые взяты параметры при номинальной частоте питания.

В результате проведенных исследований было установлено, что несинусоидальность питающего напряжения влияет на характеристики АД следующим образом:

энергетические показатели при работе АД от преобразователя частоты хуже, чем при работе от сети: КПД ниже в среднем на 2–3%, а cosφ – на 5%.

увеличивается нагрев, и в конечном итоге полезная мощность АД снижается примерно на 10–25%;

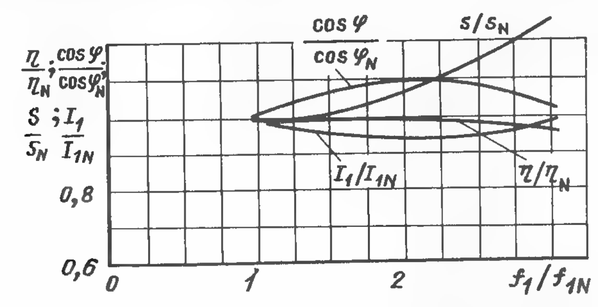


Рис. 9.25 То же, что и на рис. 9.23, но при законе управления по (9.24)

снижается максимальный момент примерно на 8–15%.

Как известно, при питании от статических преобразователей частоты вращение ротора АД становится неравномерным, а при более глубоком регулировании – дискретным. Неравномерность вращения, вызванная пульсирующими моментами, обусловленными импульсным характером напряжения, является в разомкнутых системах одним из факторов, определяющих диапазон регулирования АД. Пульсирующие моменты возникают в результате взаимодействия высших временных гармонических тока с магнитным потоком основной частоты. Исследование этих моментов в АД серии 4А показало, что их двойная амплитуда при низких частотах может в 2–3 раза превышать номинальный момент АД. Пульсирующие моменты находятся в сложной зависимости от напряжения, момента инерции, частоты питания и статического момента нагрузки на валу АД. В отдельных случаях для АД целевого назначения путем оптимального выбора параметров можно снизить указанные моменты и тем самым снизить граничную частоту. Если под граничной частотой питания понимать частоту тока, при которой неравномерность частоты вращения составляет ±10% средней частоты вращения, то для АД серии АИ с высотой оси вращения до 132 мм эта частота при 2 p = 4, 6, 8 приблизительно составляет 4–5 Гц, а для двухполюсных АД – от 1,5 до 3 Гц. Меньшие значения относятся к бóльшим габаритам.

Рассмотрим влияние частоты питания на потери от высших временных гармонических.

Потери в обмотках АД, вызванные токами ν-й гармонической, равны

$$P_{\text{м}\nu} = mI_\nu^2 R_{\text{к}\nu}. \qquad (9.25)$$

Величины, относящиеся к работе АД при текущих частотах, запишем с индексом f. Тогда отношение потерь в обмотках от тока ν-й гармонической при текущей частоте тока к потерям от ν-й гармонической при номинальной частоте

$$\frac{P_{\text{м}\nu f}}{P_{\text{м}\nu N}} = \left(\frac{I_{\nu f}}{I_{\nu N}}\right)^2 \frac{R_{\text{к}\nu f}}{R_{\text{к}\nu N}}, \qquad (9.26)$$

или

$$\frac{P_{\text{м}\nu f}}{P_{\text{м}\nu N}} = \left(\frac{U_{\nu f}}{U_{\nu N}}\right)^2 \frac{R_{\text{к}\nu f}}{R_{\text{к}\nu N}} \frac{R^2_{\text{к}\nu N} + X^2_{\text{к}\nu N}}{R^2_{\text{к}\nu f} + X^2_{\text{к}\nu f}}. \qquad (9.27)$$

Если принять, что $U_{\nu f}/U_{\nu N} \approx f/f_N$ (т.е. отсутствует регулятор потока АД),

$X_{\text{к}\nu f}/X_{\text{к}\nu N} = (f/f_N)(k_{xf}/k_{xN})$,

где k_x – коэффициент, учитывающий изменение индуктивного сопротивления рассеяния обмоток из-за вытеснения тока, то выражение (9.27) можно записать в следующем виде:

$$\frac{P_{\text{м}\nu f}}{P_{\text{м}\nu N}} = \frac{R_{\text{к}\nu f}}{R_{\text{к}\nu N}} \left(\frac{k_{xN}}{k_{xf}}\right)^2 \frac{(f/f_N)^2 (k_{xf}/k_{xN})^2 R^2_{\text{к}\nu N} + X^2_{\text{к}\nu f}}{R^2_{\text{к}\nu f} + X^2_{\text{к}\nu f}}. \qquad (9.28)$$

Ввиду того что при $f < f_N$ всегда справедливы неравенства

$R_{\text{к}\nu f}/R_{\text{к}\nu N} < 1$; $k_{xN}/k_{xf} < 1$;

$(f/f_N)^2 (k_{xf}/k_{xN})^2 R^2_{\text{к}\nu N} < R^2_{\text{к}\nu f}$,

будем иметь

$$P_{\text{м}\nu f}/P_{\text{м}\nu N} < 1. \qquad (9.29)$$

При наличии регулятора, обеспечивающего во всем диапазоне частот постоянство потока,

$$\frac{U_{\nu f}}{U_{\nu N}} = C\frac{f}{f_N}.$$

Однако и в этом случае, как показывает анализ, всегда соблюдается неравенство (9.29).

Определим потери в стали АД. Если принять, что $U \equiv f\Phi$, то $B_\nu \equiv U_\nu/f_\nu$,

$P_{c\nu}/P_{c1} = (B_\nu/B_1)^2 (f_\nu/f_1)^\beta = (U_\nu/U_1)^2 (f_\nu/f_1)^\beta (f_1/f_\nu)^2$.

Полагая $\beta = 1{,}3$, получаем

$$P_{c\nu} = P_{c1}(U_\nu/U_1)^2 (f_1/f_\nu)^{0,7}. \qquad (9.30)$$

Из (9.30) видно, что потери в стали от высших временных гармонических невелики и потери резко убывают с увеличением номера гармонической. Даже при значительном искажении формы кривой напряжения их значение не превышает 2–3% суммарных потерь в стали, следовательно, ими можно пренебречь.

Очевидно, что этот вывод можно распространить и на случай работы АД при пониженных частотах, тем более что при этом уменьшаются и основные потери в стали. Следовательно, максимальные потери от высших временных гармонических имеют место при максимальных частотах тока АД.

Рассмотрим изменение асинхронных моментов, вызванных высшими временными гармоническими, при понижении частоты:

$$\frac{M_{\text{п}\nu f}}{M_{\text{п}\nu N}} = \left(\frac{U_{\nu f}}{U_{\nu N}}\right)^2 \frac{r'_{2\nu f} f_N}{r'_{2\nu N} f} \frac{R^2_{\text{к}\nu N} + X^2_{\text{к}\nu N}}{R^2_{\text{к}\nu f} + X^2_{\text{к}\nu f}}$$

или после преобразований:

$$\frac{M_{\text{п}\nu f}}{M_{\text{п}\nu N}} = \frac{f_N}{f} \frac{r'_{2\nu f}}{r'_{2\nu N}} \times$$

$$\times \frac{(fk_{xf}/f_N k_{xN})^2 R^2_{\text{к}\nu N} + X^2_{\text{к}\nu N}}{R^2_{\text{к}\nu f} + X^2_{\text{к}\nu f}} \left(\frac{k_{xN}}{k_{xf}}\right)^2. \qquad (9.31)$$

Анализ (9.31) позволяет заключить, что с понижением основной частоты моменты от высших гармонических увеличиваются. Однако при любых частотах эти моменты малы. Так, по отношению к моменту от первой гармонической при низкой частоте ($f \leqslant 0{,}1 f_N$) в режиме короткого замыкания моменты от высших гармонических равны (если пренебречь $X^2_{\text{к}\nu f}$ по сравнению $R^2_{\text{к}\nu f}$)

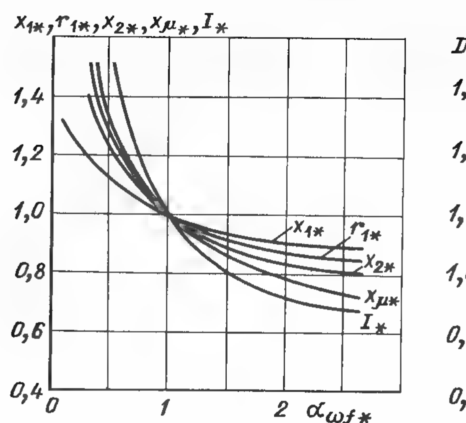
$$\frac{M_{\text{п}\nu f}}{M_{\text{п}\nu N}} = \left(\frac{U_{\nu f}}{U_{\nu N}}\right) \frac{K}{\nu}, \qquad (9.32)$$

где

$$K = \frac{r'_{2\nu f}}{r'_{2\nu N}} \frac{(R_{\text{к}\nu N}/R_{\text{к}\nu f})^2}{(1 + X_{\text{к}\nu f}/R_{\text{к}\nu})^2} \leqslant 1.$$

При прямоугольной форме кривой напряжения отношение (9.32) для пятой гармонической не превосходит 1%.

Как указывалось выше, к динамическим характеристикам частотно-регулируемых АД предъявляются повышенные требования, выполнение которых связано с соответствующим выбором параметров АД (рис. 9.26), а следовательно, с изменением массы и основных его размеров (рис. 9.27). Анализ показал, что при проектировании частотно-регулируемых АД с улучшенными динамическими характеристиками необходимо стремиться к снижению по сравнению с АД общего назначения момента инерции ротора, индуктивных сопротивлений и активных сопротивлений, причем ротора в большей степени, чем статора.



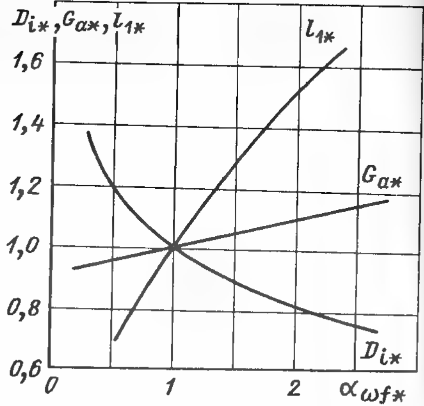


Рис. 9.26. Зависимость относительных значений параметров АД серии 4А (5,5 кВт, $2p=4$) от быстродействия

Рис. 9.27. Зависимость относительных значений массы и основных размеров того же АД от быстродействия

Для максимальной унификации узлов и деталей во многих случаях разработка частотно-регулируемых АД проводится на базе АД основного исполнения. В этом случае сохраняются магнитопроводы статора и ротора и основные конструкционные элементы. Изменениям подлежат только обмотки АД (в том числе и способы их крепления) и подшипниковые узлы.

При проектировании рассматриваемых АД должны задаваться зависимости мощности на валу для режима S1, КПД и $\cos\varphi$ от частоты вращения, диапазоны изменения частоты вращения, номинальное напряжение, диапазон изменения и гармонический состав напряжения источника питания, требования к параметрам АД.

Для проектирования частотно-регулируемых АД можно дать следующие рекомендации.

После выбора базового АД в первую очередь должна определяться расчетная частота вращения, соответствующая максимальному расчетному моменту в заданном диапазоне регулирования. Если АД предназначен для работы с постоянным моментом, за расчетную частоту вращения принимается ее максимальное значение. После этого определяется расчетное отношение максимального момента $k_{m\,p}$. Если $k_{m\,p} \geqslant 3{,}5$, то принимается расчетное значение $k_{mp} = 3{,}5$.

Расчетная мощность АД P_p при $k_{mp} \leqslant 3{,}5$ соответствует расчетной частоте вращения. При $k_{m\,p} > 3{,}5$ значение мощности увеличивается в отношении $k_{mp}/3{,}5$.

Таблица 9.20

Расчетная частота вращения n_p, об/мин	Число пар полюсов p	Расчетная частота тока f_p, Гц
$n_p \leqslant 1000$	3	$f_p \leqslant 50$
$1000 < n_p \leqslant 1500$	3	$50 \leqslant f_p \leqslant 75$
$1500 < n_p \leqslant 2400$	2; 3	$50 \leqslant f_p \leqslant 120$
$2400 < n_p \leqslant 3600$	2	$80 < f_p \leqslant 120$
$3600 < n_p \leqslant 6000$	1; 2	$60 < f_p \leqslant 200$
$n_p > 6000$	1	$f_p > 100$

Расчетная частота тока при заданном диапазоне изменения частоты определяется по формуле

$$f_p = n_p f_{min}/n_{min} = n_p f_{max}/n_{max}. \tag{9.33}$$

Число пар полюсов $p = 60 f_p/n_p$. Если p – дробное число, то диапазон изменения частоты тока корректируется.

Расчетная частота тока в случае, когда не задан ее диапазон изменения, определяется по формуле

$$f_p = n_p\, p/60,$$

где число пар полюсов определяется из табл. 9.20. Меньшие значения частоты в этой таблице соответствуют АД с относительно большими удельными потерями в стали.

Зная расчетные значения мощности, напряжения, частот вращения и тока, легко пересчитать параметры, размеры и показатели АД.

По сравнению с расчетом АД общего назначения проводят следующие дополнительные расчеты:

1) расчет добавочных токов и потерь от высших временных гармонических; при этом расчете принимается, что АД работает в режиме короткого замыкания, а его магнитная цепь насыщена потоком первой гармонической;

2) расчет суммарных токов и потерь в АД;

3) расчеты по пп. 1,2 производят для расчетной, максимальной и минимальной частот в заданном диапазоне.

Максимальный момент и расчетная мощность в данном случае определяются аналогично вышеизложенному.

При расчете частотно-регулируемого АД его размеры целесообразно определять на основании рекомендаций, приведенных для АД общего назначения, с учетом следующих дополнительных особенностей:

предварительный выбор высоты спинки h_{j1}, паза h_{z1}, длины сердечника статора l_1, индукции в воздушном зазоре B_g, линейной нагрузки A производят по формулам

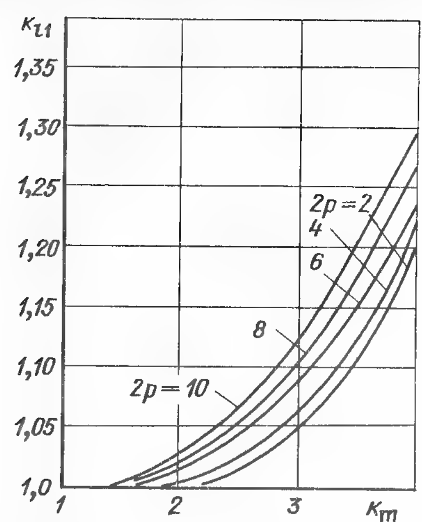


Рис. 9.28. Кривые для выбора коэффициента k_{l_1}

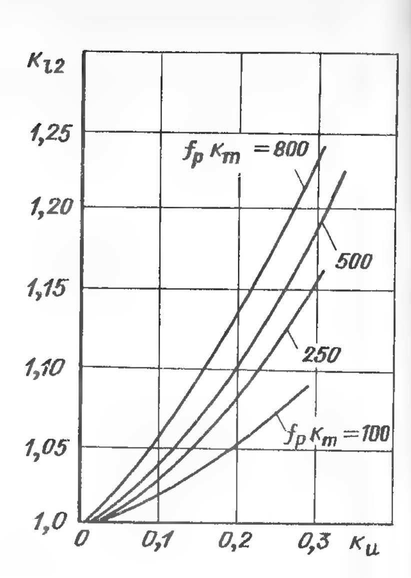


Рис. 9.29. Кривые для выбора коэффициента k_{l_2}

$$h_{j_1} \approx 0{,}13\sqrt{k_m}\sqrt[8]{2p}\,\tau; \tag{9.34}$$

$$h_{z_1} \approx h'_z - (0{,}13\sqrt{k_m}\sqrt[8]{2p} - 0{,}22)\,\tau; \tag{9.35}$$

$$l_1 \approx \frac{8\cdot10^{11} P_{\text{р}1}\, k_{l_1}\, k_{l_2}}{A' B'_g D_1^2 n_{\text{н}} \eta \cos\varphi}\;; \tag{9.36}$$

$$B_g \approx 0{,}6\sqrt{k_m}\sqrt[8]{2p}\, B'_g; \tag{9.37}$$

$$A = \frac{A' B'_g}{B_g}\, k_{l_1} k_{l_2}, \tag{9.38}$$

где h'_z, B'_g, A' — высота паза статора, индукция и линейная нагрузка, рекомендуемые для двигателя общего назначения; k_{l_1} — коэффициент, учитывающий повышенное значение кратности максимального момента (рис. 9.28); k_{l_2} — коэффициент, учитывающий добавочные потери от высших гармонических при работе АД от источника с несинусоидальным напряжением. Этот коэффициент может быть предварительно выбран по рис. 9.29, где

$$k'_u = \sqrt{(U_5/U_1)^2 + (U_7/U_1)^2}.$$

Кривые построены для усредненных значений коэффициента вытеснения и высоты паза ротора (P_2 = 1÷100 кВт), что вносит определенную погрешность. Кроме того, при расчете этих кривых учитывались потери в обмотках только от 5-й и 7-й гармонических тока в предположении, что потери от остальных гармонических (11-й, 13-й и т.д.) малы. На данном этапе расчета, не зная параметров АД и его геометрии, более точно учесть дополнительные потери невозможно. Тем не менее для предварительного выбора главных размеров АД получаемая при использовании кривых рис. 9.28 и 9.29 точность вполне достаточна.

Конструкция обмотки статора принципиально ничем не отличается от конструкции обмоток обычных АД. Однако область применения обмоток с диаметральным шагом в частотно-регулируемых АД шире, так как снижение провалов и улучшение формы кривой механической характеристики, достигаемые укорочением шага обмотки, в данном случае не имеют значения. Применительно к регулируемому АД обмотка с укороченным шагом имеет следующие преимущества: меньший вылет лобовых частей; меньшие активные и индуктивные сопротивления при заданной длине сердечника статора. Преимущества обмотки с диаметральным шагом: возможность получения большей мощности при заданных длине и диаметре статора; более простая технология. Поэтому при выборе типа обмотки кроме общеизвестных положений следует руководствоваться следующим соображением. Диаметральную обмотку целесообразно применять в АД, имеющих относительно большие значения отношения l_1/τ, при которых длина пазовой части обмотки больше длины лобовой части.

Пазы статора частотно-регулируемых двигателей целесообразно выполнять полуоткрытыми или открытыми, так как при этом удается уменьшить активное сопротивление обмотки, повысить ее качество и, следовательно, надежность машины. В то же время влияние открытия паза на пульсации поля в зазоре и поверхностные потери, а также на увеличение эквивалентного воздушного зазора проявляются в данном случае в меньшей степени, чем в АД общего назначения, из-за большего воздушного зазора.

Поскольку пусковой и минимальный моменты не оговариваются при разработке частотно-регулируемого АД (АД не работает при скольжении, превышающем критическое), выбор формы паза ротора должен производиться только на основании требования получения минимально-возможных активных и индуктивных сопротивлений обмотки. Выполнение указанного требования способствует снижению потерь и повышению максимального момента АД. Как показали исследования, пазы ротора должны иметь трапецеидальную или грушевидную форму. Во всех случаях ширина пазов статора и ротора определяется по максимальному значению индукции в стали в заданном диапазоне оптимальных соотношений для АД общего назначения. Дело в том, что если бы частотно-регулируемые АД проектировались с теми же воздушными зазорами, что

11–6983

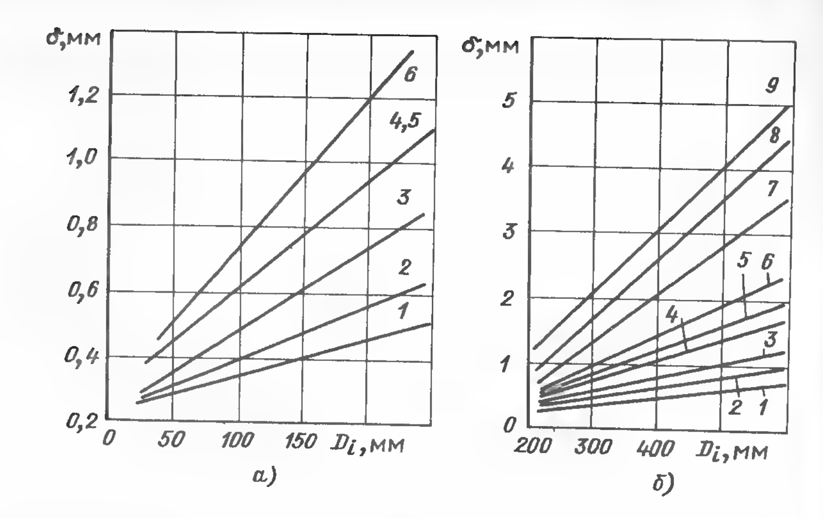


Рис. 9.30. Кривые для определения воздушного зазора при $D_i \leqslant 200$ мм (*а*) и $D_i > 200$ мм (*б*)

и АД общего назначения, и работали от источника синусоидального напряжения, то значения индукций следовало бы выбирать по тем же рекомендациям. Увеличение воздушного зазора АД приводит к увеличению его магнитного сопротивления, вследствие чего доля магнитного сопротивления стали в суммарном сопротивлении магнитной цепи существенно уменьшается и минимум общего тока статора смещается в область более высокого насыщения стали. Кроме того, чем больше насыщение машины, тем меньше r_1 (больше площадь пазов при заданных объемах стали), а следовательно, и потери от высших временных гармоник; насыщение машины приводит также к повышению k_m.

Проведенные расчетные и экспериментальные исследования показали, что при проектировании частотно-регулируемого АД следует выбирать увеличенный по сравнению с АД общего назначения воздушный зазор. По рис. 9.30 можно предварительно определить значение воздушного зазора с учетом того, что $\cos\varphi$ АД снизится на 1–5% в зависимости от мощности и числа полюсов. Чем меньше число полюсов и больше мощность АД, тем менее существенно снижается $\cos\varphi$ при увеличении воздушного зазора (относительное значение намагничивающего тока таких АД ниже). Кривые, приведенные на рис. 9.30, соответствуют значениям $2p$ и k_m, указанным в табл. 9.21, 9.22.

После расчета (или выбора) базового АД выбирают расчетные значения частоты тока и частоты вращения. Пересчитав параметры АД на эти частоты, определяют его динамические характеристики. При несоответствии этих характеристик заданным значения параметров пересчи-

Таблица 9.21

Номера кривых на рис. 9.30, *а*	$2p$	k_m
1	8; 10	Не более 1,7
2	8; 10	Более 2
3	4; 6	Не более 2
4	4; 6	Более 3
5	2	Не более 2,2
6	2	Более 3

Таблица 9.22

Номера кривых на рис. 9.30, *б*	$2p$	k_m
1	10; 12; 14	Не более 1,7
2	8	Не более 1,1
3	8	Более 2
4	6	Не более 2
5	6	Более 3
6	4	Не более 2
7	4	Более 3
8	2	Не более 2,2
9	2	Более 3

тывают, после чего определяют размеры и массу АД. Иногда необходимо дополнительно рассчитать семейство механических характеристик АД при различных частотах и различной форсировке потока, которые используются при разработке систем привода.

На основании проведенного анализа можно рекомендовать следующий алгоритм расчета специального частотно-регулируемого АД:

выбор внутреннего диаметра статора, индукции в воздушном зазоре и линейной нагрузки;

определение длины активной части;

выбор конструкции и материала обмоток, числа и формы пазов статора и ротора, воздушного зазора;

расчет поперечной геометрии АД;

расчет параметров АД;

расчет токов и потерь АД в расчетном режиме;

расчет потерь от высших временных гармонических;

расчет отношения максимального момента к номинальному, температуры обмоток, КПД и $\cos\varphi$; сравнение расчетных значений этих показателей с заданными;

корректировка расчета АД;

выбор расчетной частоты вращения;

выбор расчетной частоты тока;

пересчет параметров АД;

расчет динамических характеристик АД;

пересчет параметров АД;

проверка заданных соотношений и предельных значений параметров;

расчет размеров и массы АД;

корректировка расчета АД;

расчет рабочих характеристик АД.

Таблица 9.23

Синхронная частота вращения, об/мин	Частота, Гц	Отношение мощности частотно-регулируемого АД к мощности АД серии АИ при использовании в качестве частотно-регулируемого		
		серийного АД	АД на штампах АД серии АИ	АД на специальных штампах
3000	50	0,8–0,85	0,9–0,93	0,95–0,97
	100	–	0,98–1,05	1,09–1,15
1500	50	0,81–0,86	0,9–0,95	0,95–0,98
	75	–	0,94–0,98	0,98–1,03
	100	–	0,84–0,9	0,9–0,94
1000	50	0,82–0,87	0,91–0,95	0,95–1
	$66\frac{2}{3}$	–	0,88–0,92	0,91–0,96
750	50	0,82–0,87	0,91–0,95	0,95–0,98

В настоящее время частотно-регулируемые АД разрабатываются как модификация единой серии АД общего назначения с учетом максимальной унификации узлов и деталей. При этом предусматривается независимая вентиляция, вывод второго конца вала для размещения датчика скорости, согласование обмотки статора по напряжению с преобразователем частоты. При использовании АД общего назначения в приводах с частотным управлением в табл. 9.23 приведены соотношения мощностей АД до 100 кВт (при номинальной частоте).

Указанные соотношения справедливы для работы АД от серийных статических преобразователей частоты со ступенчатой формой кривой выходного напряжения и коэффициентом нелинейных искажений 30%. При этом КПД серийного АД, используемого в качестве регулируемого, снижается на 2–4%, а $\cos\varphi$ – в среднем на 5%; в регулируемых АД, выполненных с магнитопроводами АД серии АИ, снижение КПД составляет 1–2%, $\cos\varphi$ – 2–3%; в регулируемых АД, выполненных со специальными магнитопроводами, КПД примерно равен КПД АД серии АИ, а при n = 3000 об/мин он выше.

Как следует из табл. 9.23, разработка модификации серии АД с магнитопроводами серии АИ приводит к снижению мощности регулируемого АД в том же габарите (при заданной частоте вращения и оптимальной частоте тока) примерно на 20–25% при n = 3000 об/мин; на 15% при n = 1500 об/мин; на 10% при n = 1000 и 750 об/мин; разработка частотно-регулируемого АД со специальным магнитопроводом при тех же условиях – на 35, 20 и 15% соответственно, т.е. при разработке серии регулируемых АД на специальных штампах мощность АД может быть повышена в среднем на 5% по сравнению с мощностью регулируемого АД, выполненного на штампах АД общего назначения.

Таблица 9.24

Диапазон	Исполнение I		Исполнение II	
	Частота вращения	Частота тока, Гц	Частота вращения	Частота тока, Гц
Полный	1:3,75	24–90	1:22,5	5–90
Вниз от номинальной	2,5:1	60–24	15:1	60–5
Вверх от номинальной	1:1,5	60–90	1:1,5	60–90

При разработке модификации регулируемых АД серии АИ решались также вопросы выбора оптимальной частоты, рассматривалась целесообразность увеличения значения воздушного зазора, отказа от выполнения скоса пазов, исследовалась возможность получения заданных динамических свойств и параметров.

В серии АИ предусмотрено два исполнения: I предназначено для работы в диапазоне изменения частоты вращения 1:3,75, II – в диапазоне 1:22,5. Такое разделение диктуется тем обстоятельством, что часть регулируемых АД работает в ограниченном диапазоне частот вращения и может изготовляться с максимальным использованием узлов и деталей АД общего назначения на том же оборудовании.

Двигатели обоих исполнений выполняются в 14 высотах оси вращения основного исполнения – от 71 до 355 мм. Ряд мощностей частотно-регулируемых АД соответствует ряду мощностей АД общего назначения от 0,37 до 400 кВт. Номинальное фазное суммарное напряжение (сумма первой и высших гармонических) для АД мощностью 0,37–110 кВт равно 220 В, а для АД мощностью 132–400 кВт – 380 В. При этом предельный коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения составляет 30%.

Двигатели предназначены для продолжительного режима работы во всем диапазоне регулирования. Номинальная частота тока – 60 Гц. Предусмотрено изготовление АД со следующими числами полюсов:

Высота оси вращения, мм	2p
71–250	2, 4, 6
280–355	4, 6, 8

Диапазоны изменения частот вращения и частот тока приведены табл. 9.24. Различие в диапазонах регулирования частот вращения и частот тока обусловлено различием в значениях скольжений при номинальных и низких частотах.

Предельный закон изменения момента соответствует табл. 9.25, а напряжения – табл. 9.26.

Отношение максимального момента к номинальному при максимальной частоте тока (90 Гц) – не менее 1, 3, при номинальной частоте тока

Таблица 9.25

Диапазон изменения частоты тока, Гц	Изменение момента	
	Исполнение I	Исполнение II
5–24	–	$M = M_N = \text{const}$
24–60	$M = 0{,}5M_N(1 + s/s_N)$	$M = M_N = \text{const}$
60–90	$P_2 = P_N = \text{const}$	

Таблица 9.26

Диапазон изменения частоты тока, Гц	Закон регулирования напряжения	
	Исполнение I	Исполнение II
5–24	–	$\Phi = \text{const}$
24–60	$U/f = \text{const}$	$\Phi = \text{const}$
60–90	$U = \text{const}$	$U = \text{const}$

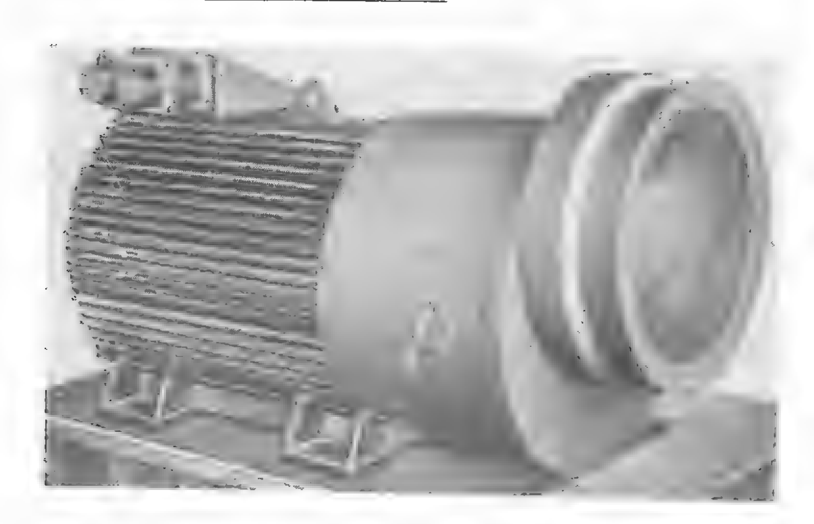


Рис. 9.31. Частотно-регулируемый АД с независимой системой вентиляции и датчиком скорости

(60 Гц) – не менее 2. Отношение пускового момента к номинальному при минимальной частоте тока – не менее 1,25; отношение начального пускового тока к номинальному – не более 2. Отношение минимального момента к номинальному для АД исполнения I должно быть не менее 0,8.

Двигатели исполнения I всех мощностей должны выполняться с самовентиляцией, АД исполнения II с высотами осей вращения 132–355 мм – с независимой вентиляцией. Степень защиты IP54. Конструкция АД предусматривает возможность крепления датчика скорости на валу (рис. 9.31).

При разработке указанных частотно-регулируемых АД удается получить в заданном габарите ту же мощность, что и АД общего назначения,

поскольку при разработке АД исключаются весьма жесткие требования к величинам пускового и минимального моментов, пускового тока, а также требования учета колебания напряжения сети.

В тех же случаях, когда предъявляются дополнительные требования к динамическим показателям АД, при заданной частоте вращения его масса растет. Вместе с тем масса специально спроектированного АД всегда меньше массы АД общего назначения, используемого в качестве частотно-регулируемого.

9.6. ОДНОФАЗНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Однофазные короткозамкнутые АД применяются там, где нет сети трехфазного тока, например в строительстве, в сельском хозяйстве и домашнем хозяйстве. Однофазные АД изготовляются в виде трех основных исполнений:

E – с рабочим конденсатором;

U – с пусковым конденсатором;

D – с пусковым и рабочим конденсаторами (двухсекционный блок конденсаторов).

Дополнительными исполнениями являются однофазные АД с вспомогательной обмоткой, имеющей повышенное сопротивление (исполнение R), а также с рабочим конденсатором и повышенным сопротивлением обмотки ротора (исполнение ER).

Все АД в зависимости от требований к начальному пусковому моменту имеют различные схемы и исполнения обмотки. Если АД с рабочим конденсатором (ряд E) имеют вспомогательную обмотку с рабочим конденсатором, которая включена постоянно, то у АД рядов U и ER вспомогательная обмотка отключается в процессе пуска в зависимости от частоты вращения и тока. У АД с рабочими и пусковыми конденсаторами (ряд D) вспомогательная обмотка с рабочим конденсатором остается постоянно включенной, а пусковой конденсатор после пуска отключается (рис. 9.32, *а*). Различным модификациям АД соответствуют различные предельно допустимые характеристики механизмов, ориентировочные значения моментов которых приведены на рис. 9.32, *б*.

Увязка мощностей с установочными размерами для вариантов P и C приведена в табл. 9.27. Номинальные мощности соответствуют продолжительному режиму работы S1. Верхние значения номинальных мощностей для различных типов АД определяются ограничениями номинального и начального пусковых токов, связанных обычно с возможностями сетей однофазного тока. Следует отметить, что применение АД с мощностями выше 1,5 кВт в большинстве сетей однофазного тока связано с большими трудностями.

В табл. 9.28 даны предельные значения параметров, определяющих пусковые режимы АД.

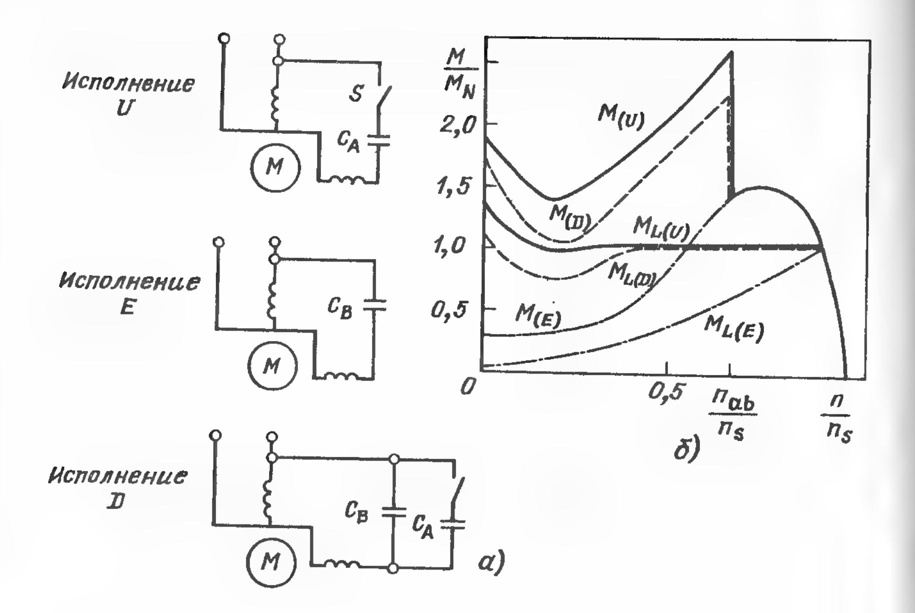


Рис. 9.32. Схемы включения обмоток однофазных АД (*а*) и их механические характеристики (*б*):

$M_{(U)}$, $M_{(D)}$, $M_{(E)}$ – вращающий момент АД для исполнений U, D, E; $M_{L(U)}$, $M_{L(D)}$, $M_{L(E)}$ – возможный нагрузочный момент для исполнений U, D, E; S – центробежный выключатель или реле; n_s – синхронная частота вращения; n_{ab} – частота вращения в момент отключения вспомогательной обмотки; C_A – пусковой конденсатор; C_B – рабочий конденсатор

Конструктивное исполнение АД по способу монтажа:

Основное исполнение. IM1001, IM2001, IM2101, IM3001, IM3601

Дополнительное исполнение . . . IM1011–IM1071, IM2011–IM2071, IM2111–IM2171, IM3011–IM3031, IM3611–IM3631

Степень защиты АД – IP54, способ охлаждения IC0141. Вибрационная скорость, измеренная при 0,3 U_N, не должна превышать 2,8 мм/с. Предельные значения звуковой мощности АД приведены в табл. 9.29.

Конструкция однофазных АД соответствует в значительной степени конструкции основного исполнения трехфазных АД (рис. 9.33). Отличия связаны в основном с конденсаторами и элементом для отключения вспомогательной обмотки (табл. 9.30).

Таблица 9.27

Высота оси вращения, мм		Номинальная мощность, кВт, для рядов		Высота оси вращения, мм		Номинальная мощность, кВт, для рядов	
Вариант P	Вариант C	E, D	U	Вариант P	Вариант C	E, D	U
		2 p = 2				2 p = 4	
45	–	0,025 0,04	0,016 0,025	45	–	0,016 0,025	0,01 0,016
50	56	0,06 0,09	0,04 0,06	50	56	0,04 0,06	0,025 0,04
56	63	0,12 0,18	0,09 0,12	56	63	0,09 0,12	0,06 0,09
63	71	0,25 0,37	0,18 0,25	63	71	0,18 0,25	0,12 0,18
71	80	0,55 0,75	0,37 0,55	71	80	0,37 0,55	0,25 0,37
80	90	1,1 1,5	0,75 1,1	80	90	0,75 1,1	0,55 0,75
90	100	2,2 3	1,5 2,2	90	100	1,5 2,2	1,1 1,5

Таблица 9.28

Параметр	Предельные значения параметров для исполнения		
	E	U	D
Отношение начального пускового момента к номинальному (минимальное значение)	0,3	1,8	1,6
Отношение максимального момента к номинальному (минимальное значение)		1,4	
Отношение минимального момента к номинальному (минимальное значение)	0,3	1,3	1
Отношение начального пускового тока к номинальному (максимальное значение)	5	6	6

Таблица 9.29

Номинальная мощность, кВт	Предельные значения звуковой мощности, дБ, по шкале А		Номинальная мощность, кВт	Предельные значения звуковой мощности, дБ, по шкале А	
	$2p=2$	$2p=4$		$2p=2$	$2p=4$
0,01–0,06	69	65	0,37–1,1	81	77
0,09–0,25	75	77	1,5–4	86	81

Таблица 9.30

Дополнительные детали и узлы для однофазных АД	Необходимость в дополнительных узлах и деталях для исполнений			
	ER	U	E	D
Панель выводов	X	X	X	X
Штуцер с учетом кабеля конденсатора		X	X	XX[3]
Крепежные элементы для конденсатора		X	X	XX[3]
Центробежный выключатель[1] или пусковое реле[2]	X	X		X

[1] При применении центробежного выключателя изменяются детали подшипникового щита, кожуха вентилятора и вала.

[2] При применении пускового реле изменяется вводное устройство.

[3] Детали, необходимые в двухкратном количестве, т.е. для пускового и рабочего конденсаторов.

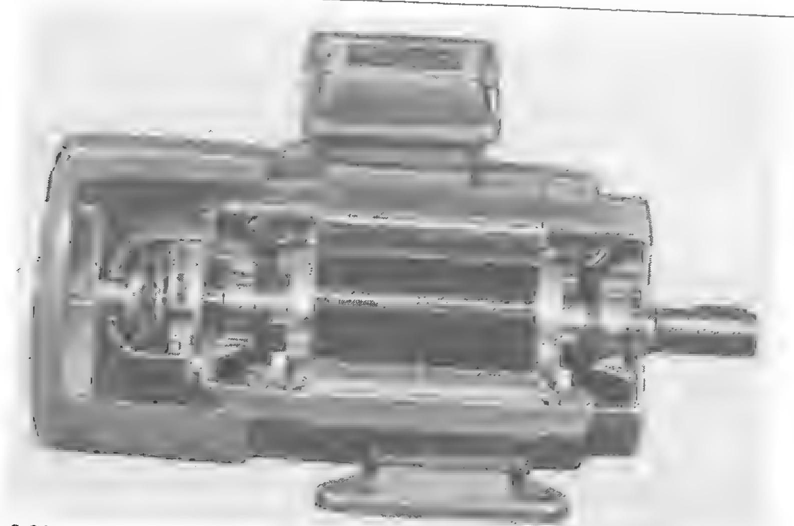


Рис. 9.33. Разрез однофазного двигателя исполнения U (с пусковым конденсатором)

В качестве элемента отключения для двигателей исполнений U или D могут применяться центробежные выключатели или токовые реле. Центробежные выключатели могут либо встраиваться в АД, либо пристраиваться к нему со стороны, противоположной приводу, что обеспечивает доступ и техническое обслуживание центробежного выключателя. Надежность двигателей рядов U и D в значительной степени зависит от надежности коммутирующих элементов.

Центробежный выключатель должен работать независимо от положения АД и не должен реагировать на механическую вибрацию и удары. За срок службы выключателей устанавливается 100 000 коммутационных операций.

Особое внимание следует обратить на не зависящую от направления вращения и от старения стабильность частоты вращения в момент отключения. Частоту вращения в момент отключения следует устанавливать с учетом частоты вращения при максимальном моменте, допустимых отклонений напряжения, а также температуры вспомогательных обмоток и конденсаторов. Должен быть также обеспечен пуск двигателей при заданных моментах инерции и нагрузках.

Радиопомехи, связанные с отключающим устройством, устанавливаются не более класса F3 по СТ СЭВ.

Аналогичные требования предъявляются и к реле. Так как реле срабатывают в зависимости от тока, то в общем случае, в отличие от центробежных выключателей, унификация исполнений реле затрудняется. Однако возможность размещения пускового реле во вводном устройстве позволяет уменьшить длину АД и облегчает замену или ремонт коммутирующих элементов. Другим преимуществом является возможность использования реле для отключения АД при максимальном токе.

Вместо отключающих элементов возможно применение терморезисторов для ограничения тока во вспомогательной обмотке. Преимущество этого решения состоит в исключении переключающих контактов. Однако применение резисторов ограничивается тем, что из-за их термической инерции возможное число коммутаций в час значительно уменьшается и не превосходит 10. Применение полупроводниковых приборов для включения вспомогательной фазы является пока еще неэкономичным из-за их большой цены. В дальнейшем по мере развития и удешевления полупроводниковых приборов они будут все больше и больше вытеснять контактные устройства.

Панель выводов вводного устройства содержит те же присоединительные элементы, что и панель АД трехфазного тока, но соответственно специфике число и обозначение присоединительных элементов отличаются от таковых для основного исполнения (рис. 9.34).

Для изготовления однофазных АД используется та же электротехническая сталь, что и для АД трехфазного тока. Магнитопровод статора можно использовать такой же, как для АД трехфазного тока, но однофазные АД отличает от трехфазных сердечник ротора как по числу

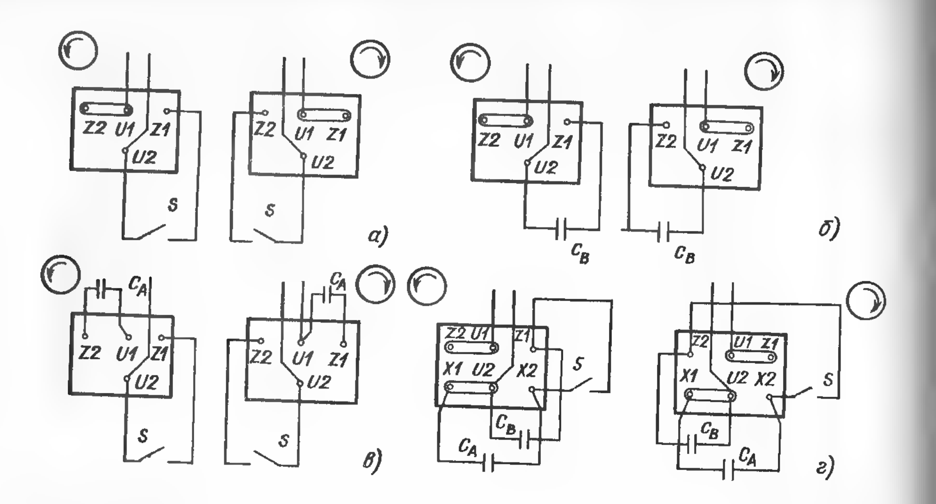


Рис. 9.34. Панель выводов и схема соединения обмоток однофазных АД различных исполнений:

а – R; *б* – E; *в* – U; *г* – D. Расположение выводов не стандартизировано; *U1, U2* – рабочая обмотка; *Z1, Z2* – вспомогательная обмотка; *X1, X2* – коммутирующий элемент

Таблица 9.31

Высота оси вращения, мм	Число пазов	
	статора	ротора
56		18
63	24	
71		22
80	36	28
90		

пазов, так и по их поперечному сечению. В табл. 9.31 показаны соотношения чисел пазов, которые хорошо зарекомендовали себя для четырехполюсных однофазных АД.

Изоляция обмоток однофазных АД такая же, как и у трехфазных АД основного исполнения.

Чаще всего в однофазных АД применяются однослойные обмотки из круглого эмаль-провода с использованием механизированной укладки.

Однофазные АД в основном рассчитаны на номинальное напряжение 220 В и номинальную частоту 50 Гц.

В качестве рабочих для АД исполнения E применяются конденсаторы из металлизированной бумаги или металлизированной пластмассы с небольшими коэффициентами потерь и номинальными напряжениями от 300 до 450 В. Соответственно их назначению рабочие конденсаторы должны постоянно работать в диапазоне изменения напряжения, питающего АД. Зависимость напряжения на конденсаторе от частоты вращения АД показана на рис. 9.35. Обычно мощность двигателя и емкость конденсатора выбираются так, чтобы в диапазоне 0,5–1 P_N напряжение конденсатора не превосходило номинального.

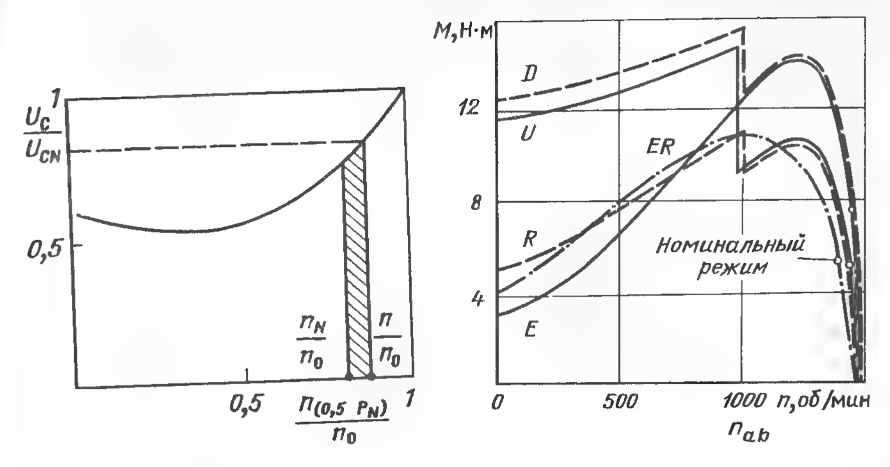


Рис. 9.35. Напряжение на рабочем конденсаторе в зависимости от частоты вращения двигателя

Рис. 9.36. Механические характеристики однофазных АД различных исполнений

В качестве пусковых для АД исполнений U и D применяются электролитические конденсаторы с номинальным напряжением до 320 В. Они пригодны только для кратковременных нагрузок, так как при длительном приложении переменного напряжения электролит недопустимо нагревается и испаряется. Для пусковых конденсаторов также справедлива зависимость напряжения на конденсаторе, показанная на рис. 9.35, но отключение их осуществляется в диапазоне частоты вращения от 0,65 n_0 до n_0.

Так как АД с рабочим конденсатором (исполнение E) работает в номинальном режиме с двумя обмотками и с приблизительно круговым вращающимся полем, то он имеет более высокую номинальную мощность, чем АД исполнения U, у которых в номинальном режиме работы включена только рабочая обмотка.

Механические характеристики однофазных АД одного габарита различных исполнений представлены на рис. 9.36.

Высокую номинальную мощность и начальный пусковой момент обеспечивает только АД с рабочим и пусковым конденсаторами (исполнение D). Двигатели с пусковым конденсатором (исполнение U) примерно равноценны с исполнением D по начальному пусковому моменту, но из-за снижения максимального момента имеют номинальную мощность на одну ступень меньше.

В ряде случаев АД с рабочим конденсатором (исполнение E) изготовляют с ротором, имеющим повышенное сопротивление обмотки (исполнение ER), что позволяет достигнуть более высокого пускового

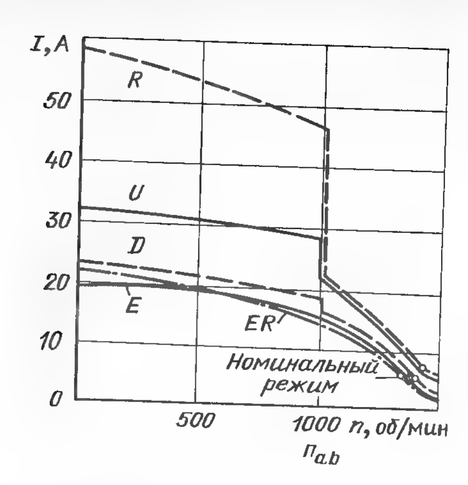
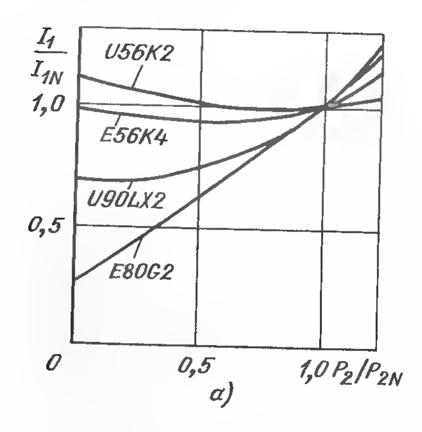


Рис. 9.37. Зависимость тока от частоты вращения для однофазных двигателей различных типов

момента. Однако такие АД имеют более низкий максимальный момент и относительно высокие потери в роторе, что ведет к снижению номинальной мощности.

Недостатком однофазного АД с вспомогательной обмоткой, имеющей повышенное сопротивление (исполнение R), является относительно высокий начальный пусковой ток. Сравнение значений тока для различных типов четырехполюсных АД одинаковой мощности (0,75 кВт) показано на рис. 9.37. Пусковой ток АД исполнения R со вспомогательной обмоткой повышенного сопротивления почти в 2 раза больше, чем АД исполнения U, хотя первый при этом имеет в 2 раза меньший начальный пусковой момент. Из рис. 9.37 видно, что более низкие значения номинального тока, а следовательно, более высокие энергетические показатели имеют



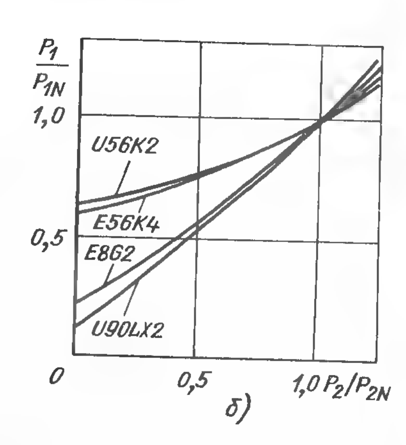


Рис. 9.38. Относительные токи (*а*) и потребляемые мощности (*б*) однофазных АД различных типов в зависимости от нагрузки

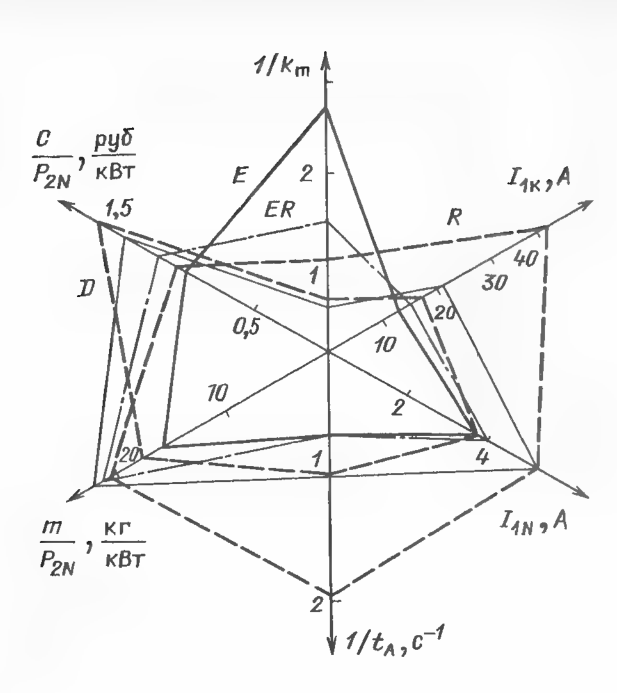


Рис. 9.39. Сравнение технических и экономических характеристик четырехполюсных однофазных АД мощностью 0,55 кВт различного исполнения:

$1/k_m$ – отношение номинального момента к начальному пусковому; C/P_{2N} – относительная цена двигателя и конденсатора, руб/кВт; m/P_{2N} – относительная масса двигателя и конденсатора, кг/кВт; $1/t_a$ – обратная величина допустимой длительности пуска, 1/с; I_{1k} – начальный пусковой ток, А; I_{1N} – номинальный ток, А

АД с постоянно включенной вспомогательной обмоткой (исполнения E, ER, D).

Зависимость потребляемых тока и мощности от нагрузки увеличивается с ростом номинальной мощности (рис. 9.38, *а*, *б*). Однофазные АД небольшой мощности, особенно двигатели с рабочим конденсатором (исполнение E), даже в режиме холостого хода могут иметь ток больше, чем при номинальной нагрузке.

На рис. 9.39 приведено сравнение важнейших критериев для выбора АД в виде диаграммы в полярных координатах. При этом допустимое время пуска, оцениваемое по нагреву обмотки при скорости нарастания температуры 10°С/с, в первом приближении определяет пригодность данного типа АД для работы в повторно-кратковременном режиме.

Все типы однофазных АД находят применение в зависимости от приводимого ими механизма и условий эксплуатации.

9.7. ДВИГАТЕЛИ СО ВСТРОЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАЩИТОЙ

Защита обмотки от превышения температуры выше допустимой наиболее надежно обеспечивается с помощью температурных датчиков (термодатчиков), встраиваемых непосредственно в обмотку.

Термодатчик реагирует на температуру места встраивания. Следовательно, его действие не зависит от причины возникновения опасного нагрева: перегрузки, работы в двухфазном режиме, числа включений в час, превышающих допустимое, ухудшения условий охлаждения, чрезмерного повышения температуры окружающей среды и т.д. Характерно, что термодатчик имеет определенное значение температуры срабатывания, которое изменить нельзя.

Температура срабатывания должна, с одной стороны, иметь достаточно большое значение, чтобы в номинальном режиме и при допустимых длительных и временных перегрузках АД защита не срабатывала, но с другой стороны, она должна препятствовать возникновению таких температур, при которых будет сокращаться срок службы изоляции. Следовательно, температура обмотки при срабатывании защиты должна несколько превышать допустимое значение. Однако это превышение не должно быть длительным и частым, чтобы предотвратить преждевременное старение изоляции.

Требования, предъявляемые к встроенной температурной защите, изложены в Публикации МЭК 34-11. В этой Публикации определены два значения температуры срабатывания защиты, соответствующие медленному (при перегрузках) и быстрому (при пуске) нагреванию. Предел по температуре при медленном нагревании ниже, чем при быстром. Это вызвано тем, что в первом случае температура термодатчика практически такая же, как температура места его встраивания. При быстром нагревании рост температуры этого элемента отстает от роста температуры защищаемой обмотки. Кроме того, при медленном нагревании изоляция дольше подвергается действию температуры, чем при быстром.

В табл. 9.32 даны предельно допустимые значения температур обмоток для разных классов нагревостойкости и предельно допустимые значения температур срабатывания защиты. Для длительной нагрузки приведены два значения температуры: υ_{max} – предельно допустимое значение для данной изоляционной системы и Θ_{max} – среднее предельно допустимое значение температуры обмотки, определяемое методом сопротивления. Предельные температуры срабатывания защиты Θ'_{max} и Θ''_{max} согласно Публикации МЭК 34-11 имеют два значения для категорий 1 и 2. Значения для категории 2 указаны в скобках и допускаются только в особых случаях.

Тепловая связь между термодатчиком и обмоткой в месте их контакта играет определяющую роль в работе термодатчика. Рассмотрим тепловую схему замещения элемента (рис. 9.40).

Таблица 9.32

Тепловой режим	Температура	Значения температуры, °С, для классов нагревостойкости системы изоляции				
		A	E	B	F	H
Установившийся	Предельно допускаемая (максимальное значение) υ_{max}	105	120	130	155	180
	Предельно допускаемая (среднее значение) Θ_{max}	100	115	120	140	165
Медленное нагревание	Срабатывания защиты (предельное значение) Θ'_{max}	125 (140)	140 (155)	145 (165)	170 (190)	195 (215)
Быстрое нагревание	Срабатывания защиты (предельное значение) Θ''_{max}	180 (200)	195 (215)	200 (225)	225 (250)	250 (275)

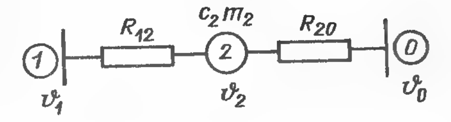


Рис. 9.40. Схема замещения встраиваемого элемента:

ϑ_0 – температура окружающей среды; ϑ_1 – температура обмотки в месте контакта с датчиком; ϑ_2 – температура термодатчика; R_{12} – термическое сопротивление между термодатчиком и обмоткой; R_{20} – термическое сопротивление между термодатчиком и окружающей средой; c_2m_2 – теплоемкость датчика

Тепловой поток от места крепления датчика *1* проходит через тепловое сопротивление к термодатчику *2*, который в свою очередь может отдавать тепло в окружающую среду *О*. Запишем дифференциальное уравнение

$$\frac{\upsilon_1-\upsilon_2}{R_{12}}\,dt = m_2c_2d\upsilon_2 + \frac{\upsilon_2-\upsilon_0}{R_{20}}\,dt. \tag{9.39}$$

В первом приближении можно пренебречь отдачей теплоты от термодатчика к окружающей среде, тогда

$$\frac{\upsilon_1-\upsilon_2}{R_{12}}\,dt = m_2c_2d\upsilon_2. \tag{9.40}$$

Если ввести понятие постоянной времени $\tau_s = m_2c_2R_{12}$, то из (9.40) получим

$$\upsilon_1 - \upsilon_2 = \tau_s\frac{d\upsilon_2}{dt}\ . \tag{9.41}$$

Из (9.41) видно, что при определенной скорости изменения температуры датчика различие в температурах обмотки и датчика определяется теплоемкостью элемента и термическим сопротивлением между обмоткой и датчиком.

Но нельзя не учитывать, что выражение (9.41) справедливо при следующих допущениях:

термочувствительный элемент является однородным телом и температура по его объему распределена равномерно;

термочувствительный элемент в месте контакта отводит теплоту от обмотки, но это не влияет на температуру последней;

отдача теплоты от термочувствительного элемента к окружающей среде мала и ей можно пренебречь.

Из (9.41) также видно, что в установившемся тепловом режиме и в режиме медленного нагревания температура термочувствительного элемента практически будет равна температуре обмотки в месте контакта. Однако эти температуры в режиме быстрого нагревания могут значительно различаться.

Быстрым нагреванием АД будем считать процесс, происходящий при коротком замыкании, когда температура обмотки растет по линейному закону при условии, если потери в ней постоянны и теплота не отводится в окружающую среду. Средняя скорость нарастания температуры, °C/с, определяется плотностью тока в обмотке:

$$\nu_{\Theta} = dv_1/dt = J \cdot 10^6/(\gamma\rho c), \qquad (9.42)$$

где J — плотность тока, А/мм²; γ — удельная электрическая проводимость, См/м; ρ — плотность, кг/дм³; c — удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C).

С учетом скорости нарастания температуры по уравнению (9.42) температура обмотки в момент t будет равна

$$v_1(t) = v_0 + v_{\Theta} t,$$

где v_0 — температура окружающей среды.

Тогда уравнение (9.41) будет иметь следующий вид:

$$v_0 + v_{\Theta} t - v_2(t) = \tau_s \frac{dv_2}{dt}, \qquad (9.43)$$

решение которого

$$v_2 = v_0 + v_{\Theta} t - v_{\Theta} \tau_s (1 - e^{-t/\tau_s}). \qquad (9.44)$$

Из (9.44) следует, что при $t \geqslant 4\tau_s$ разность температуры обмотки и термочувствительного элемента практически постоянна и равна $v_1 - v_2 \approx \nu_{\Theta}\tau_s$ (рис. 9.41).

При выборе типа датчиков температурной защиты и места их встраивания в обмотку должно учитываться следующее:

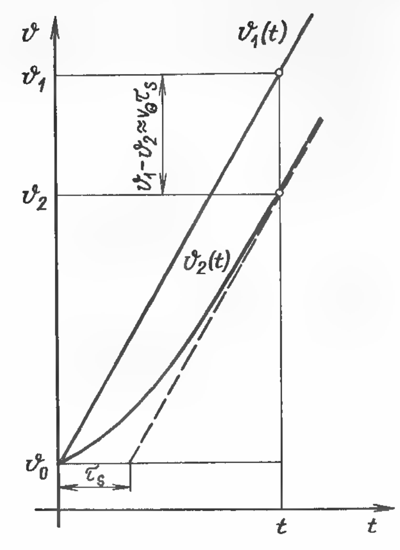


Рис. 9.41. Изменение температур обмотки и датчика в зависимости от времени

температура обмотки при срабатывании защиты (среднее значение которой измеряется методом сопротивления) не должна превышать предельно допустимого значения;

температура обмотки не постоянна по ее объему. Можно различать распределение температуры в продольном направлении и по поперечному сечению. При нестационарном режиме распределение температуры зависит от скорости нагревания;

датчик отводит теплоту от места установки, температура которого отличается от средней температуры обмотки;

датчик не может реагировать непосредственно на температуру места встраивания, и, таким образом, разность их температур, особенно при быстром нагревании, может оказаться весьма значительной;

температура срабатывания термодатчика и схемы защиты задаются с некоторым допуском, поэтому надо учитывать поле допусков температур срабатываний.

На основе этих соображений место и способ встраивания, температуру срабатывания термодатчика и постоянную времени связи надо выбрать таким образом, чтобы защита срабатывала еще до достижения предельных значений температур.

Таким образом, правильный выбор параметров защиты нельзя осуществить только по рабочей температуре, соответствующей данному классу нагревостойкости. Необходимо знать тепловые характеристики двигателя в месте встраивания термодатчика не только в установившемся, но и в нестационарном режиме.

При выборе температуры срабатывания необходимо учитывать два основных требования:

с одной стороны, необходимо обеспечить, чтобы при номинальном режиме работы, а также при неблагоприятных, но допустимых условиях работы температурная защита не срабатывала. Отсюда получается нижний предел температуры срабатывания $v_{n\,min}$;

с другой стороны, температурная защита непременно должна срабатывать, если обмотка достигнет такой температуры, длительное действие которой опасно влияет на срок службы изоляции. Это будет верхним пределом температуры срабатывания $v_{n\,max}$.

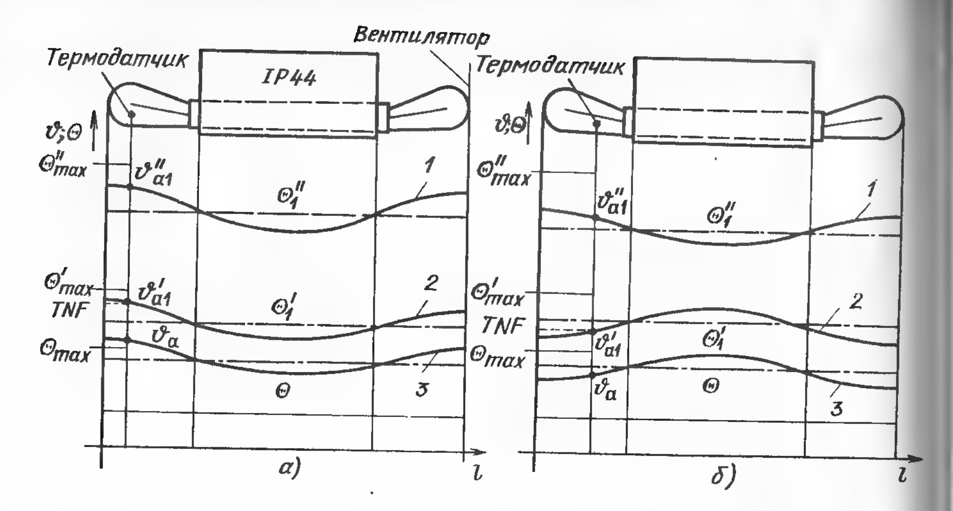


Рис. 9.42. Изменение температуры по длине обмотки при различных нагрузках для двигателей исполнений по степени защиты IP44 (*а*) и IP23 (*б*)

Минимальное значение нижнего предела температуры срабатывания можно определить, если знать предельно допустимую среднюю температуру Θ_{max} для класса нагревостойкости системы изоляции. Однако полученная таким образом температура не всегда является нижним пределом температуры срабатывания. Например, если для увеличения срока службы изоляции нагрузка АД меньше допустимой, то максимально допустимая температура для изоляции наступает только при перегрузке. Другой случай: если при медленном нагревании надо обеспечить косвенную защиту машины от превышений температуры ротора, то целесообразно нижнюю границу срабатывания выбрать меньше допустимой для класса нагревостойкости обмотки статора. Также целесообразно уменьшить нижний предел температуры срабатывания, если при максимальном значении средней температуры обмотки Θ_{max} в какой-либо части обмотки температура будет превосходить υ_{max} (см. табл. 9.32).

Номинальную температуру срабатывания защиты, служащей для аварийной сигнализации, также следует устанавливать меньше значений, определенных по классу нагревостойкости.

Следовательно, для определения номинальной температуры термодатчика необходимо знать зависимость между температурой обмотки в месте встраивания датчика и средней температурой обмотки. Рисунки 9.42, *а* и *б* дают качественное представление об изменении температуры по длине обмотки при различных тепловых нагрузках. Кривая *1* относится к быстрому нагреванию, кривая *2* – к медленному нагреванию, кривая *3* – к номинальному режиму.

Сначала подробно рассмотрим случай, когда область температуры срабатывания определяется только Θ_{max} и Θ'_{max}, т.е. $\Theta'_{min} \geqslant \Theta'_{max}$, $\Theta_{max} \leqslant \Theta'_{max}$.

Обозначим номинальную температуру срабатывания термодатчика через TNF и примем согласно Публикации МЭК допуск для нее ±6° С. Тогда при тепловой перегрузке, вызывающей медленное нагревание, температура срабатывания защиты определяет область TNF–6° С и TNF+6° С.

Если во время срабатывания температурной защиты температура обмотки в месте встраивания датчика υ'_{a1} равна средней температуре обмотки Θ'_1, то Θ'_{min} = TNF–6° С и Θ'_{max} = TNF + 6° С. Однако обычно $\upsilon'_{a1} - \Theta'_1 \neq 0$; это отклонение можно определить на основе результатов измерений или расчетов. Значение $\upsilon'_{a1} - \Theta'_1$ может быть как положительным, так и отрицательным.

Если известны эти значения, то можно говорить о нижнем и верхнем пределах значений TNF

$$(\mathrm{TNF})_{min} = \Theta'_{min} + (\upsilon'_{a1} - \Theta'_1) + 6°\mathrm{C}; \quad (9.45)$$

$$(\mathrm{TNF})_{max} = \Theta'_{max} + (\upsilon'_{a1} - \Theta'_1) - 6°\mathrm{C}. \quad (9.46)$$

Из (9.45), (9.46)

$$\Theta'_{min} = (\mathrm{TNF} - 6°\mathrm{C}) - (\upsilon'_{a1} - \Theta'_1); \quad (9.47)$$

$$\Theta'_{max} = (\mathrm{TNF} + 6°\mathrm{C}) - (\upsilon_{a_1} - \Theta'_1). \quad (9.48)$$

Для того чтобы определить при каком отклонении температуры $\upsilon'_{a1} - \Theta'_1$ датчик с заданным значением TNF обеспечивает удовлетворительную температурную защиту, можно записать

$$(\upsilon'_{a1} - \Theta'_1)_{min} = \mathrm{TNF} - 6°\mathrm{C} - \Theta'_{max}; \quad (9.48а)$$

$$(\upsilon'_{a1} - \Theta'_1)_{max} = \mathrm{TNF} + 6°\mathrm{C} - \Theta'_{max}. \quad (9.48б)$$

Из рис. 9.43 видно, при каких значениях $\upsilon'_{a1} - \Theta'_1$ можно обеспечить необходимую температурную защиту при различных значениях TNF и классах нагревостойкости изоляции обмоток.

На рис. 9.44 показаны все значения TNF, которые могут обеспечить защиту обмоток с различными классами нагревостойкости изоляции.

Применение диаграмм можно показать на следующем примере. Обмотка статора АД имеет изоляционную систему класса нагревостойкости F. Критической по нагреву частью АД является статор; АД по нагреву полностью использован. При тепловой нагрузке, вызывающей медленное нагревание, $\upsilon'_{a1} - \Theta'_1 \approx +8°$ С. Если $\Theta'_{min} = \Theta_{min} = 140°$ С и $\Theta'_{max} = \Theta_{max} = 170°$ С, то

$$(\mathrm{TNF})_{min} = 140 + 8 + 6 = 154°\mathrm{C};$$

$$(\mathrm{TNF})_{max} = 170 + 8 - 6 = 172°\mathrm{C}.$$

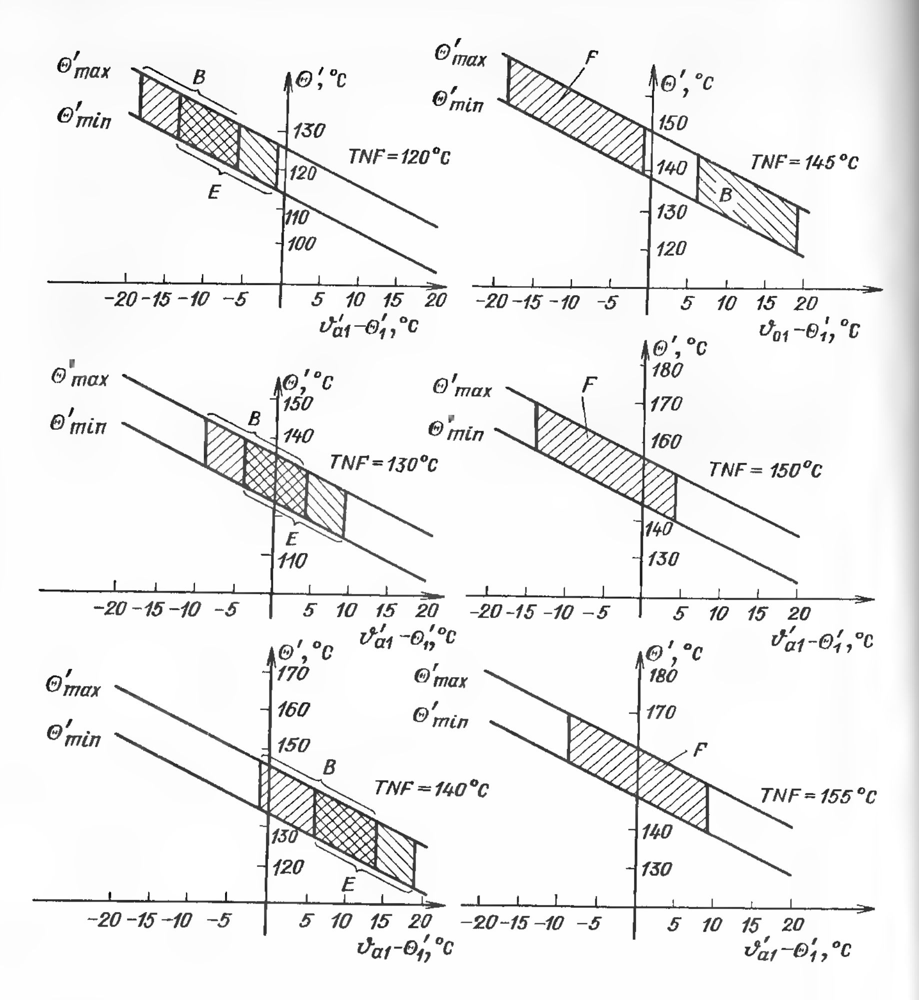


Рис. 9.43. Зависимости Θ_1' от $|\vartheta_{a1}' - \Theta_1'|$ при различных значениях TNF

Таким образом, TNF = 155, 160 и 170°C, что соответствует рис. 9.44.

Область средней температуры $\Theta_{min}' - \Theta_{max}'$ для области срабатывания термодатчиков с различным значением TNF можно рассчитать по (9.48а) и (9.48б), а также по рис. 9.43:

TNF, °C	Θ_{min}', °C	Θ_{max}', °C
155	141	153
160	146	158
170	156	168

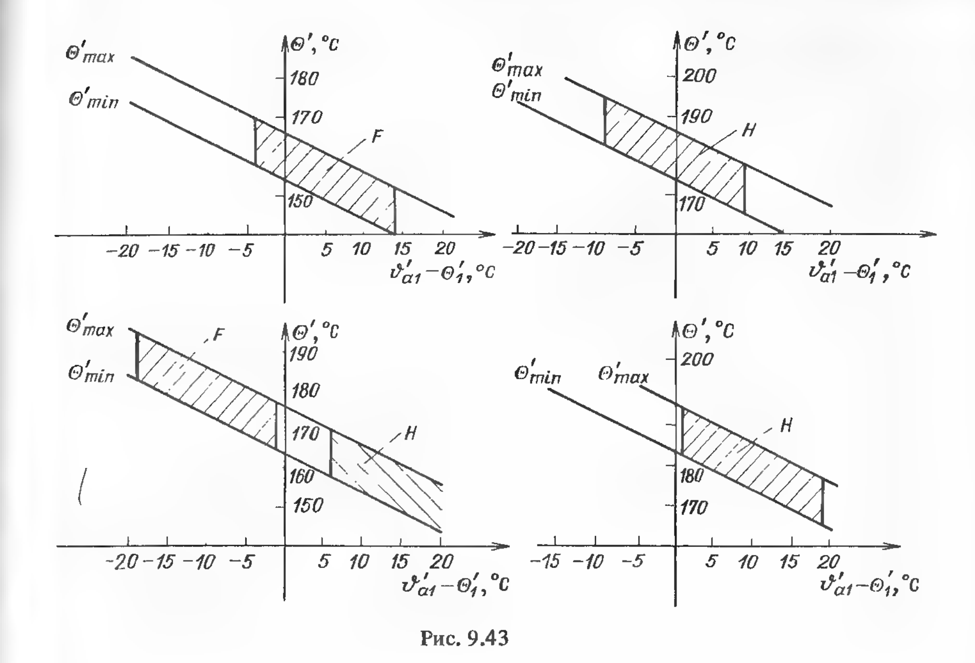


Рис. 9.43

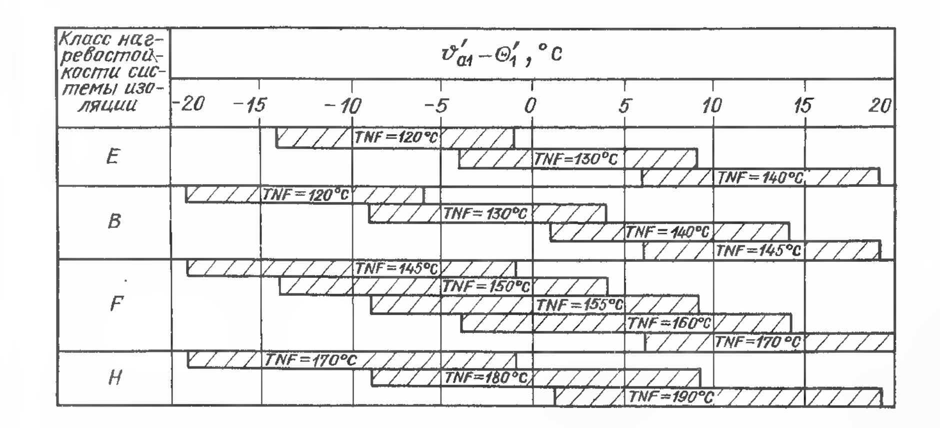


Рис. 9.44. Значение TNF для различных классов изоляции

Если применена система изоляции класса нагревостойкости F, а использование АД по температуре соответствует классу нагревостойкости B, то $\Theta_{min}' \geqslant 120$°C. В этом случае по рис. 9.44 можно выбрать термодатчик с TNF = 140°C или TNF = 145°C, и тогда

TNF, °C	Θ'_{min}, °C	Θ'_{max}, °C
140	126	138
145	131	143

Эти температуры можно получить из рис. 9.43.

Ниже будет показано, что целесообразно выбирать термодатчик с несколько меньшим значением TNF, так как в этом случае требования к постоянной времени датчика менее жесткие.

При перегрузке, вызывающей медленное изменение температуры, предположение, что температура термодатчика практически без отставания меняется одновременно с температурой места встраивания, правильно. Однако при быстром нагревании наблюдается существенная разница между температурами термодатчика и обмотки в месте его встраивания. Значение "отставания температуры" термодатчика зависит от скорости нагревания в месте встраивания v_υ, от постоянной времени связи термодатчика τ_s и от температуры в месте контакта в начале быстрого нагревания υ_a. На рис. 9.45 показано качественное представление изменения во времени температуры термодатчика и обмотки при медленном и быстром изменении температуры. Наряду с температурой обмотки в месте встраивания датчика показана также средняя температура обмотки. В этом случае термодатчик встроен практически в самую нагретую часть обмотки статора.

У АД с короткозамкнутым ротором наибольшая скорость нарастания температуры – при номинальном напряжении и заторможенном роторе. При заданной системе температурной защиты и нагревании из холодного состояния отставание температуры термодатчика будет больше, чем при быстром нагревании из рабочего состояния.

Для установления требования к постоянной времени связи термодатчика необходимо определить изменение во времени средней температуры

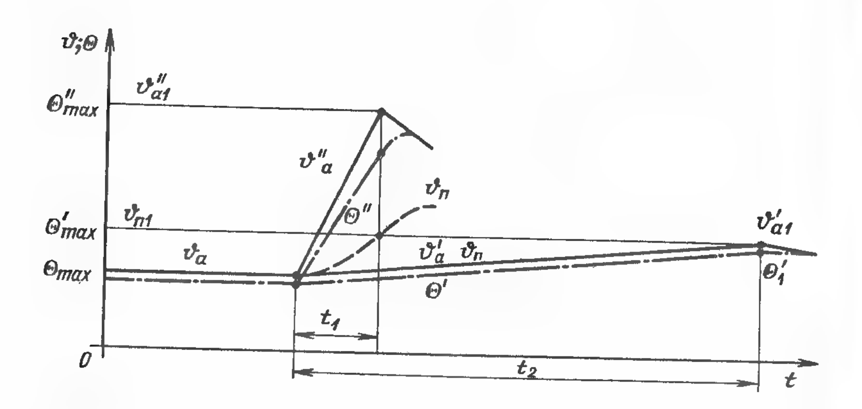


Рис. 9.45. Изменение температуры термодатчика ϑ и обмотки Θ во времени

обмотки в режиме короткого замыкания и, кроме того, надо знать соотношение температур обмотки в месте встраивания термодатчика и самого датчика.

Нагрев обмотки АД при коротком замыкании в первом приближении можно считать адиабатическим, и в этом случае для скорости нарастания температуры действительно уравнение (9.42).

При быстром нагревании предельной средней температурой обмотки будет температура Θ''_{max}, указанная в табл. 9.32.

Полагая, что скорость нарастания температура обмотки ν_Θ известна и постоянна и нагревание начинается из холодного состояния, время, необходимое для достижения Θ''_{max}, определяем по формуле

$$t_1 = (\Theta''_{max} - \upsilon_0)/\nu_\Theta . \qquad (9.49)$$

За время t_1 изменяется также температура обмотки в месте встраивания датчика. Скорость нарастания температуры обмотки в месте контакта с датчиком связана со средней скоростью нарастания зависимостью

$$\nu_\upsilon = \beta \nu_\Theta . \qquad (9.50)$$

Значение β зависит от выбора места встраивания термодатчика. Если термодатчик встроен вблизи места обмотки с максимальной температурой, то $\beta > 1$. В противном случае возможно $\beta \leqslant 1$. Для АД со степенью защиты IP44 рекомендуется встраивать термодатчик так, чтобы $\beta = 1{,}05 \div 1{,}1$.

Температура обмотки в месте встраивания через время t_1

$$\upsilon''_{a1} = \upsilon_0 + \nu_\upsilon t_1 . \qquad (9.51)$$

В течение времени t_1 увеличивается также и температура термодатчика, но она отстает от температуры обмотки.

Испытания, проведенные с помощью позисторов, подтверждают предположение, по которому термодатчик можно рассматривать как элемент с одной постоянной времени. В этом случае температуру термодатчика в момент времени t_1 получим с помощью уравнения (9.44):

$$\upsilon_{n1} = \upsilon_0 + \nu_\upsilon t_1 - \nu_\upsilon \tau_s (1 - e^{-t_1/\tau_s}). \qquad (9.52)$$

Из разности уравнений (9.51) и (9.52) получаем разность температур обмотки и термодатчика в момент времени t_1:

$$\Delta\upsilon = \nu_\upsilon \tau_s (1 - e^{-t_1/\tau_s}). \qquad (9.53)$$

В том случае, если $\nu_\upsilon = \text{const}$,

$$\tau_s = \Delta t/(1 - e^{-t_1/\tau_s}) \qquad (9.54)$$

и при $t_1 \geqslant 4\tau_s$ $\tau_s \approx \Delta t$. В общем случае для определения τ_s предложен графический метод (рис. 9.46), так как в уравнении (9.54) τ_s выражена в неявной форме.

Графически уравнения (9.49) – (9.52) представлены на рис. 9.47, где υ_R'' – температура ротора.

Если температурная защита срабатывает при TNF +6° С, то

$$\Delta \upsilon = \upsilon_{a1}'' - (\text{TNF} + 6); \tag{9.55}$$

если v_υ = const, то

$$\Delta t = \Delta \upsilon / v_\upsilon. \tag{9.56}$$

Как видно из рис. 9.47, Δt – время запаздывания температуры термодатчика (разность достижения по времени температуры срабатывания датчиком и обмоткой в месте его встраивания).

Если $t_1/\Delta t \geqslant 4$, то $\Delta t \approx \tau_s$ и значение τ_s можно определить по рис. 9.46.

Однако для выбора термодатчика необходимо знать не постоянную времени связи, а собственную постоянную времени термодатчика τ. Значение τ_s всегда больше, чем τ; разность значений определяется качеством тепловой связи обмотки и термодатчика. На качество тепловой связи влияют размещение проводов обмотки относительно термодатчика и форма проводов: круглая или прямоугольная. При круглых проводах влияют также диаметр, тип провода и изоляционного материала, его толщина, метод пропитки, пропиточный лак и т.д. В результате многочисленных испытаний по встраиванию термодатчиков в АД и в модели обмоток установлен относительно большой разброс τ_s даже тогда, когда установка термодатчиков производилась по одной и той же технологии. Отсюда следует, что для уменьшения разброса необходимо очень тщательно встраивать термодатчики.

Данные τ и τ_s, полученные на основе результатов испытаний, сведены в табл. 9.33. Значения τ_s справедливы для пропитанной обмотки при тщательно встроенном датчике.

На основе вышесказанного можно составить номограмму для определения максимального значения τ. Применение номограммы покажем на примере.

Рассмотрим тот же АД, для которого определялись возможные значения TNF термодатчиков. Обмотка статора АД изготовляется из круглого медного эмалированного провода; класс нагревостойкости системы изоляции F; плотность тока при коротком замыкании 40 А/мм². Термодатчик встроен в лобовую часть обмотки; скорость нарастания температуры в месте встраивания датчика составляет приблизительно 1,07 средней скорости нарастания температуры обмотки; υ_0 = 20° С. В этом случае

$$v_\Theta \approx 40^2/198 = 8{,}08\,°\text{C/c};$$

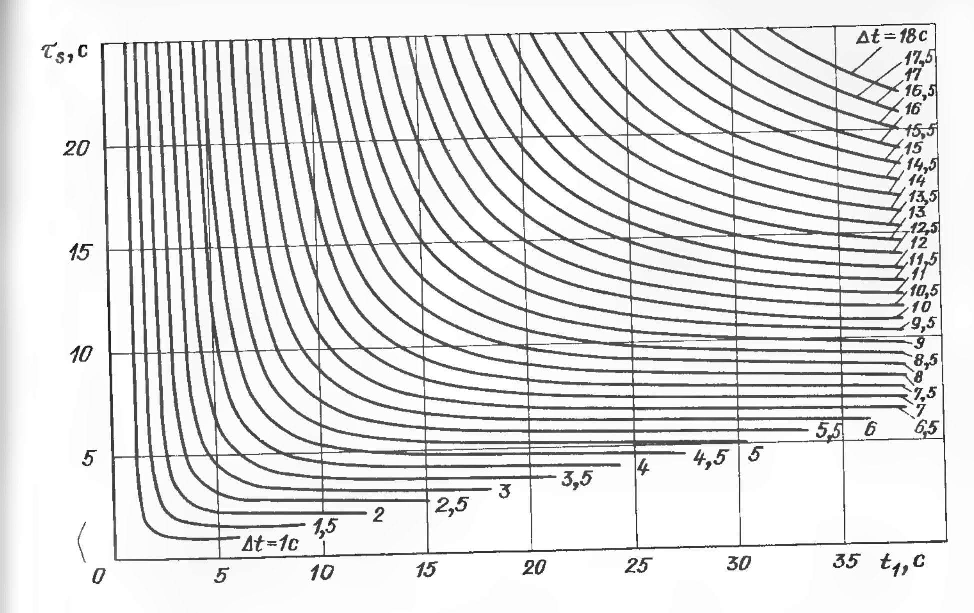


Рис. 9.46. Графики для определения τ_s

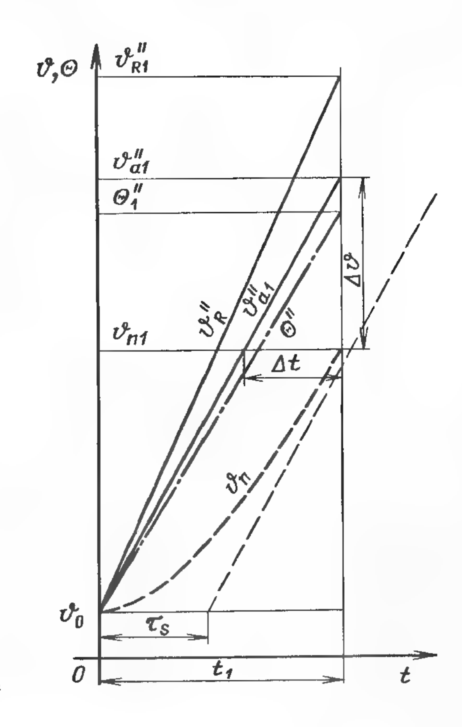


Рис. 9.47. Графическое представление уравнений (9.49) – (9.54)

Таблица 9.33

Тип термодатчика	τ, с	τ_s, с, для обмоток из эмалированных проводов			Диаметр датчика, мм	Длина датчика, мм	Сечение выводного провода, мм^2
		A	*B*	*C*			
Малогабаритный позистор (PTM-M-KOPORC, P400C822-SIEMENS)	Не более 3	4–5	5–7	10–12	Не более 3,5	8	0,06
Позистор нормальных размеров (PTM-KOPORC P400C521-SIEMENS)	Не более 9	11–14	–	–	Не более 5	15	0,2
KLIXON 9700	18	40–50	–	–	4,5×7,5*	24	0,75

*Датчик прямоугольной формы.

Примечание. В таблице приняты обозначения: *A* – провод круглого сечения диаметром около 1 мм; *B* – провод прямоугольного сечения, термодатчик плотно зажат между двумя проводами; *C* – провод прямоугольного сечения, датчик плотно прижат к одному проводу, расстояние до другого провода 1–2 мм.

Таблица 9.34

TNF, °C	Δv, °C	Δt, с	$\frac{t_1}{\Delta t}$	τ_s', с	τ_s, с	τ, с
140	93,4	10,8	2,35	12,5		
145	88,4	10,22	2,48	11,55	11,5	9
155	78,4	9,07	2,8	9,9		
160	73,4	8,49	2,98	9,05	4,5	3
170	63,4	7,33	3,46	7,7		

$$v_v \approx 1{,}07 \cdot 8{,}08 = 8{,}645 °\text{C/c};$$

$$t_1 = (225 - 20)/8{,}08 = 25{,}37 \text{ c};$$

$$v''_{a1} = 20 + 8{,}645 \cdot 25{,}37 = 279{,}4 °\text{C}.$$

Полученные результаты можно свести в табл. 9.34.

Указанная в табл. 9.34 τ_s' – постоянная времени нагревания, которая в крайнем случае, при Θ''_{max}, обеспечивает срабатывание температурной защиты. Те же самые результаты получим, если используем номограмму рис. 9.48. Если выбираем датчики, указанные в табл. 9.33, то в приведенном выше примере при TNF = 155°C, TNF = 160°C и TNF = 170°C при-

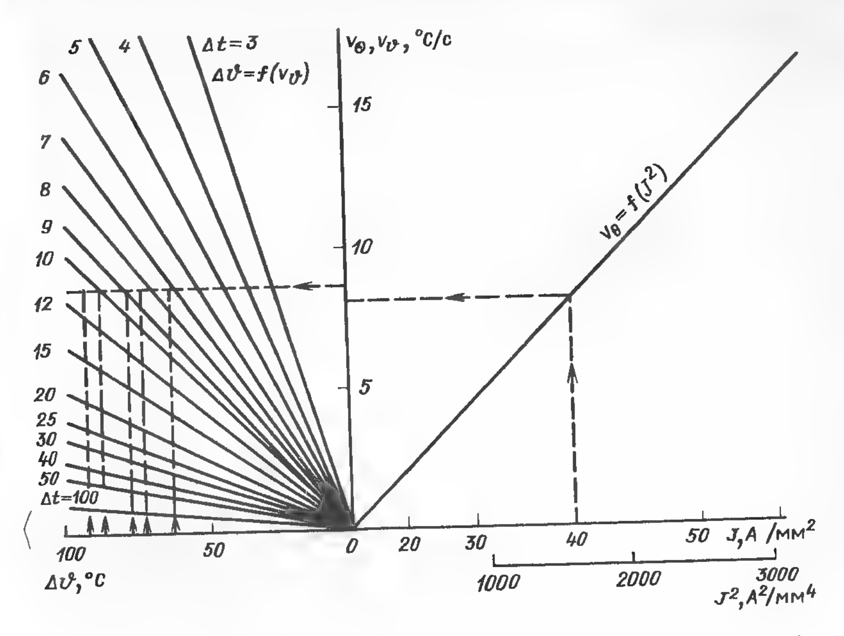


Рис. 9.48. Номограмма для определения постоянных времени термодатчика

годен позистор № 1 (τ_s = 4,5 с), а при TNF = 140°C и TNF = 145°C – позистор № 2 (τ_s = 11,5). Обычно $\tau_s < \tau_s'$, поэтому средняя температура обмотки при считывании температурной защиты при TNF + 6°C также меньше, чем Θ'_{max}.

Из примера видно, что на требование к постоянной времени термодатчика влияет не только скорость нарастания температуры, но и значение TNF выбранного термодатчика. В отдельных случаях может иметь влияние постоянная времени термодатчика.

В приведенном примере при TNF = 140°C при быстром нагревании позистор № 1 (табл. 9.33) может обеспечить эффективную защиту до значения плотности тока в режиме короткого замыкания приблизительно 67 А/мм². Но если использовать датчик типа KLIXON (см. табл. 9.33) с TNF = 140°C, то при быстром нагревании эффективная защита обеспечивается при плотности тока в режиме короткого замыкания максимально 20 А/мм².

Для обеспечения непосредственной температурной защиты термодатчик встраивают в наиболее нагретую часть АД, в место с максимальной температурой. Это не всегда возможно, и в таких случаях применяется косвенная температурная защита. У АД со степенью защиты IP44 как при медленном, так и при быстром нагревании самой нагретой частью обмотки являются места лобовой части обмотки, наиболее удаленные

от магнитопровода, куда и встраивают термодатчики. У АД без внутренней циркуляции датчики встраивают в лобовые части со стороны, противоположной внешнему вентилятору. У АД с внутренней циркуляцией воздуха, имеющих с одной стороны внутренний вентилятор, термодатчики встраиваются в лобовую часть обмотки, расположенную со стороны внутреннего вентилятора.

У АД со степенью защиты IP23 охлаждение лобовых частей обмотки обычно лучше, чем пазовых, поэтому при перегрузке, вызывающей медленное нагревание, самая нагретая часть обмотки находится в магнитопроводе, а при заторможенном роторе в случае быстрого нагревания самая нагретая часть обмотки – лобовая.

У АД со степенью защиты IP23 термодатчики также можно встроить в лобовую часть обмотки, но вблизи сердечника, у АД с односторонней вентиляцией термодатчик встраивают в лобовую часть обмотки со стороны вентилятора; у АД с двухсторонней вентиляцией практически безразлично, в какую лобовую часть обмотки встраивать термодатчик. При перегрузках, вызывающих медленное изменение температуры, установленная таким образом температурная защита для обмотки статора является косвенной, а при нагревании и заторможенном роторе в первом приближении она является непосредственной температурной защитой.

При двухслойной обмотке целесообразно встраивать термодатчики во внутренний слой, чтобы лучше учитывать влияние температуры ротора, особенно в режиме короткого замыкания. Термодатчик встраивают перед пропиткой обмотки, но после формовки лобовых частей по одному на фазу.

При обмотке из провода круглого сечения во время укладки обмотки в место встраивания термодатчика в середину лобовой части катушечной стороны целесообразно поместить вкладыш из изоляционного материала, соответствующий размерам термодатчика и не вызывающий повреждений во время формовки лобовых частей обмотки. После завершения процесса формовки лобовых частей обмотки этот вкладыш удаляется и на его место помещается термодатчик. Встраивание термодатчика надо проводить тщательно для улучшения тепловой связи термодатчика и обмотки. С этой же целью перед встраиванием термодатчик целесообразно окунуть в жидкую синтетическую смолу соответствующего класса нагревостойкости. Продольная ось термодатчика должна быть параллельна проводам обмотки; провода должны быть плотно прижаты к термодатчику, для чего наружную поверхность катушечной стороны бандажируют несколькими слоями ленты. Выводы термодатчика на максимально возможной длине должны быть параллельны проводам катушки. Последовательное включение позисторов должно осуществляться по возможности короткими проводами.

Соединение и вывод термодатчиков не должны образовывать петлю, в которой переменное магнитное поле создавало бы напряжение.

При обмотке из провода прямоугольного сечения только в исключительном случае термодатчик можно разместить так, чтобы со всех сторон его окружали провода. Однако безусловно необходимо, чтобы хотя бы с двух сторон термодатчик был плотно прижат к проводам. В большинстве случаев термодатчик можно разместить в лобовой части обмотки между катушечными сторонами. В целях исключения повреждения термодатчика между двумя катушечными сторонами ближе к месту крепления надо поместить дистанционную прокладку из твердого изоляционного материала. Две свободные стороны термодатчика необходимо защитить хорошим тепло- и электроизоляционным материалом для уменьшения воздействия охлаждающего воздуха. Две катушечные стороны, прижатые к термодатчику, целесообразно закрепить несколькими слоями бандажной ленты.

Выбор системы температурной защиты следует рассматривать как с технической, так и с экономической точки зрения. Если анализировать систему температурной защиты только с технической точки зрения, то предпочтительна система температурной защиты, которая при любых условиях защищает двигатель от опасного перегрева и срок службы которой по крайней мере такой же, как у защищаемого двигателя. Однако если затраты на систему защиты соизмеримы со стоимостью двигателя или больше ее, то такая система оправдана только тогда, когда имеется большая вероятность перегрузки и урон от выхода двигателя из строя велик.

Самый простой и дешевый способ применения встроенной температурной защиты – использование термодатчика-выключателя (например, биметаллического микровыключателя). В настоящее время имеются такие относительно надежные выключатели, которые при тепловой перегрузке, вызывающей медленное изменение температуры, обеспечивают необходимую температурную защиту. Однако их размеры и тепловые постоянные времени существенно больше, чем у позисторов, поэтому при быстром нагревании температура защищаемой части в момент срабатывания будет существенно больше, чем при позисторах, причем эта разность будет тем большей, чем больше скорости нарастания температуры. Кроме того, биметаллические термодатчики имеют относительно бóльшие массы и тем самым нарушают температурное поле обмотки в месте встраивания, в результате чего увеличивается запаздывание по температуре.

Однако эта система температурной защиты имеет большое преимущество, так как до определенного значения тока (при применении замыкающихся контактов) может включаться последовательно с защищаемой обмоткой, и таким образом, в момент срабатывания непосредственно разрывается цепь управления обмотки.

Эта система температурной защиты применяется, главным образом, в однофазных АД; в трехфазных АД одновременный разрыв трех фаз обеспечивается отдельными аппаратами. Для температурной защиты,

задачей которой является аварийная сигнализация, можно применять термодатчики с замыкающимися контактами.

Известны такие термодатчики-выключатели, которые воспринимают не только температуру, но и скорость нарастания температуры в месте встраивания.

С точки зрения надежности и срока службы термодатчики-выключатели намного отстают от позисторной температурной защиты; несмотря на это их применение довольно широко, особенно в однофазных АД мощностью до нескольких сотен ватт, используемых главным образом в бытовой технике.

У машин с высокоиспользованным ротором и со встроенными в обмотку статора термодатчиками по отношению к ротору осуществима только косвенная температурная защита, однако имеются такие системы температурной защиты, у которых термодатчик встроен в обмотку ротора или на температуру ротора реагирует орган, чувствительный к теплоизлучению. Однако применение этих систем ограничено и известно главным образом из технической литературы.

При выборе системы встроенной температурной защиты или требований к ней следует обратить внимание на то, что если термодатчики с одинаковыми постоянными времени встраиваются в обмотку из прямоугольного провода, то обычно они имеют бо́льшую постоянную времени связи, чем при встраивании их в обмотку из круглого провода. Неблагоприятное последствие этого проявляется при быстром нагревании.

В АД, у которых плотность тока в режиме короткого замыкания велика, в момент срабатывания встроенной температурной защиты температура обмотки статора или клетки ротора может превышать допустимую. Этого можно избежать, если комбинировать встроенную температурную защиту с реле максимального тока, которое при заторможенном роторе отключает АД прежде, чем наступит опасный нагрев.

В двигателях серии АИ для температурной защиты приняты позисторы. Технические данные позисторов, используемых в СССР, приведены ниже:

Тип позистора	Температура срабатывания, °C	Время срабатывания, с
Ст 141......	105, 130	15
Ст 142......	130, 145, 160	15

9.8. ДВИГАТЕЛИ С ТОРМОЗНЫМ УСТРОЙСТВОМ

Широкая автоматизация технологических процессов требует автоматического управления такими режимами электроприбора, как переключение скоростей, реверсирование и торможение. Это связано с необходимостью быстрой и точной его остановки при большом числе включений в единицу времени. Поэтому важное значение приобретают АД, снабженные надежно действующими электромеханическими тормозными

устройствами. Их роль существенно возрастает в связи с интенсификацией производственных процессов, увеличением движущихся масс, скоростей движения и частоты торможений.

Двигатели с электромеханическими тормозными устройствами (ЭМТУ) находят применение в подъемно-транспортном машиностроении, станкостроении, деревообрабатывающей и легкой промышленности, сельском хозяйстве и других отраслях. Непрерывно растущая потребность в них объясняется тем, что по сравнению с известными электрическими способами торможения механический способ позволяет резко увеличить число торможений в единицу времени, обеспечить постоянство тормозного момента, улучшить тепловой режим АД, сократить количество пусковой аппаратуры и упростить схему управления двигателем, обеспечить получение малых (ползучих) скоростей, их регулировку, плавность торможения.

В настоящее время ежегодная потребность в двигателях с ЭМТУ в СССР составляет более 1,5 млн. шт. в год.

За последние годы разработано и освоено более 45 различных конструктивных разновидностей тормозных устройств с гидравлическими, центробежными, винтовыми, магнитогидравлическими приводами, с тормозными электромагнитами постоянного и переменного тока, широко используются так называемые самотормозящиеся АД.

Анализ известных конструкций тормозных устройств позволил систематизировать их и составить классификацию, которая приведена на рис. 9.49. Согласно ей существуют четыре большие группы двигателей с ЭМТУ.

В первую группу входят самотормозящиеся АД — это АД, в которых магнитный поток, возбуждаемый статорной обмоткой, используется не только для создания вращающего момента на валу, но и для управления механическим тормозом. По сравнению с обычными в самотормозящихся АД, как правило, изменяются магнитопроводы статора и ротора либо одного статора или одного ротора, они имеют специальные валы и подшипниковые щиты со стороны вентилятора.

Характерная особенность второй группы АД с ЭМТУ заключается в том, что встроенный в подшипниковый щит либо пристроенный к нему электромагнит имеет общее с обмоткой статора питание, а чаще зависимое от нее. Эти АД также имеют специальный вал, подшипниковый щит и вводное устройство, в котором размещен блок управления тормозом.

В третью группу входят обычные АД с тормозным устройством, имеющим независимое от обмотки статора питание, при этом пристраивание ЭМТУ осуществляется за счет незначительной доработки серийного подшипникового щита и участка вала со стороны вентилятора.

Четвертая группа охватывает механические тормоза, выполненные в виде отдельных автономных устройств, имеющих независимое от обмотки статора питание. Эти тормоза устанавливаются на общей фундаментной плите рядом с обычным серийным АД (с двумя свободными концами вала) без всякой его доработки.

12–6983

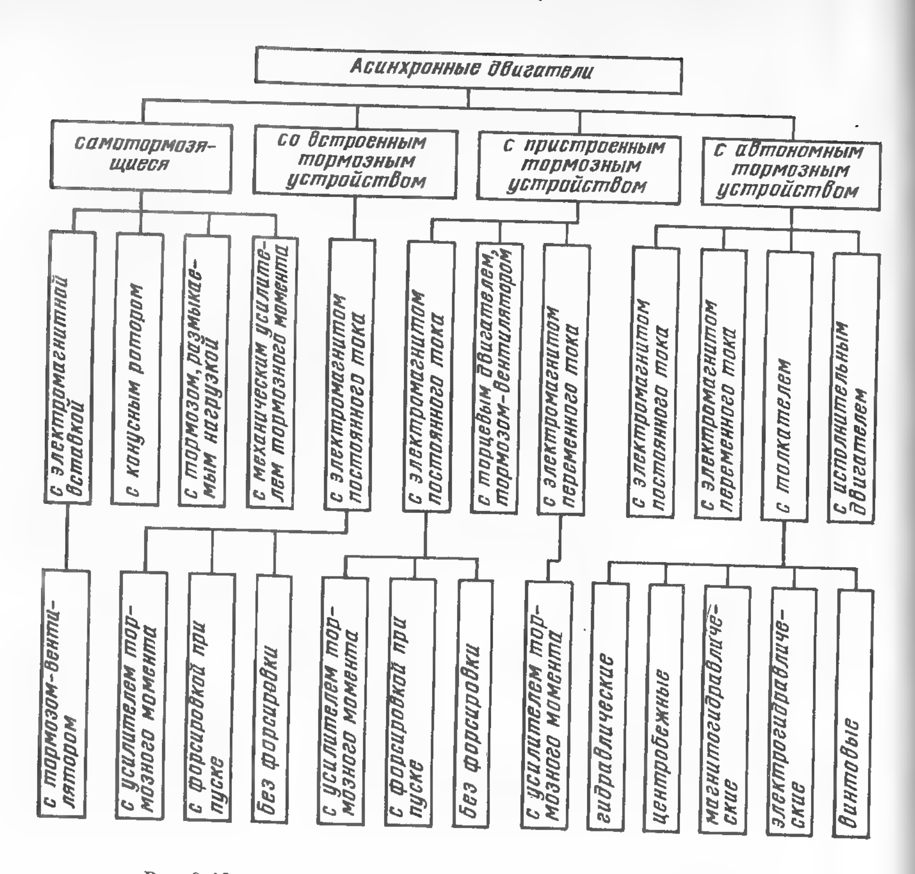


Рис. 9.49. Классификация АД с тормозными устройствами

Каждая из перечисленных групп АД с ЭМТУ в свою очередь может быть разделена на более мелкие подгруппы по определенным признакам, характеризующим более детально конструкцию ЭМТУ. В частности, следующие ступени классификации разделяют тормозные устройства по видам источников растормаживающего усилия, способам усиления тормозного момента и т.д.

Все это свидетельствует о большом количестве вариантов возможных технических решений по созданию оптимальных конструкций тормозных устройств для конкретных требований, предъявляемых к двигателям с ЭМТУ. Ниже приводятся основные требования, предъявляемые к АД с ЭМТУ серии АИ 56-160.

1. Максимальная унификация с АД общего назначения. Конструкция тормозного устройства должна обеспечивать пристраивание его к серийному АД с двумя свободными концами вала. При этом крепление вращающейся части тормозного устройства должно производиться на

одном из свободных концов вала, а крепление (либо фиксация от проворота) невращающейся части – на неподвижных элементах привода. В технически и экономически обоснованных случаях допускается размещать вращающуюся часть тормозного устройства на участке вала, предназначенном для установки вентилятора, а крепление неподвижной части производить на подшипниковом щите. При этом варианте допустима незначительная доработка серийных АД: подшипникового щита (проточка центрирующего замка, сверление отверстий для крепления магнитопровода и т.д.), вала (фрезерование шпоночного паза, нарезание резьбы, сверление отверстий с торца), кожаха (увеличение его длины).

2. Высокая надежность и долговечность: без замены деталей тормозные устройства должны обеспечивать 1–2 млн. срабатываний, при этом их вероятность безотказной работы должна быть не менее 0,95.

3. Снижение энергетических показателей и ухудшение пусковых характеристик по сравнению с соответствующими показателями и характеристиками АД основного исполнения должно быть незначительным (не более 1–1,5%). Мощность, потребляемая ЭМТУ в установившемся режиме, не должна превышать 0,5% мощности, потребляемой АД.

4. Большая допустимая частота включений в единицу времени: в зависимости от числа полюсов АД, режима работы – в пределах 120–1500 включений в час.

5. Простота конструкции, ее технологичность, минимальные габариты, масса и стоимость.

6. Минимальная потребность в дополнительных комплектующих элементах.

7. Плавность торможения при высоком тормозном моменте. Отношение максимального тормозного момента к номинальному моменту АД должно быть не менее 1,75–2.

8. Быстрое замыкание и размыкание тормозного устройства: значение времени запаздывания при включении – не более 0,04–0,1 с, а при отключении – не более 0,1 – 0,2 с.

9. Тормозная система должна обеспечивать работу АД в любом положении, а также допускать возможность растормаживания не только электрическим, но и механическим способом.

10. Конструкция ЭМТУ должна обеспечивать возможность компенсации зазора между тормозными поверхностями по мере износа фрикционных накладок, а также обеспечивать удобство обслуживания и замены износившихся деталей.

Изучение патентно-технической литературы, анализ и исследования известных отечественных и зарубежных ЭМТУ дают основание сделать вывод о том, что в настоящее время нет конструкций АД с тормозными устройствами, которые в полной мере удовлетворяли бы вышеизложенным требованиям, поэтому при создании АД с ЭМТУ серии АИ потребовалась разработка принципиально новых, оригинальных конструкций тормозных устройств.

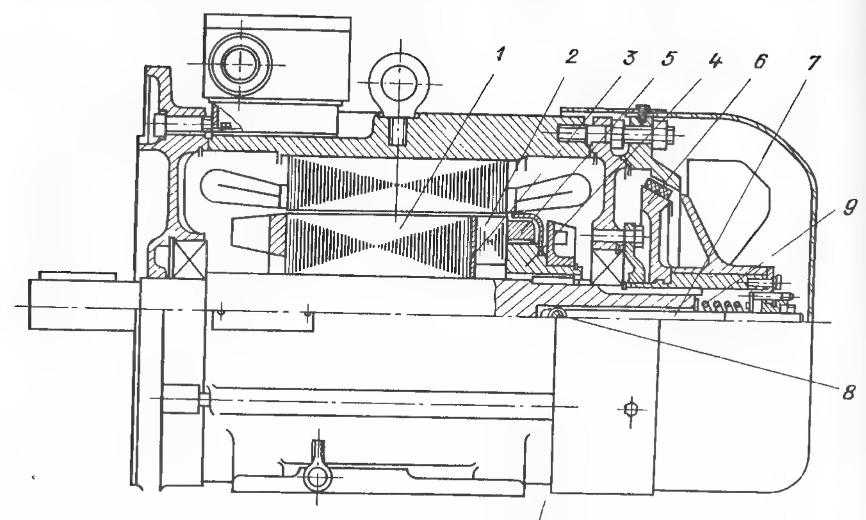


Рис. 9.50. Самотормозящийся АД с электромагнитной вставкой на роторе

Одна из таких конструкций, разработанная в СССР, представлена на рис. 9.50. В ней от АД основного исполнения используются все детали и узлы, за исключением подшипникового щита, вала и ротора. Ротор состоит из двух частей: основной *1* и дополнительной *2*, разделенных немагнитной прокладкой *3*. Основная часть сердечника набирается из обычных листов, а дополнительная имеет продольную шихтовку (рис. 9.51). На валу рядом с короткозамыкающим кольцом расположена электромагнитная вставка *4*, выполняющая функции спинки ротора (в дополнительной его части нет спинки) и якоря ЭМТУ. Вставка свободно перемещается на валу в аксиальном направлении.

При подаче напряжения на обмотку АД вставка под действием полей рассеяния короткозамыкающего кольца *5*, преодолевая действие возвратной пружины *9*, притягивается к торцу дополнительной части ротора, растормаживая фрикционный диск *6* через тягу *7* и штифт *8*. По мере увеличения частоты вращения вала поток рассеяния вокруг коротко-

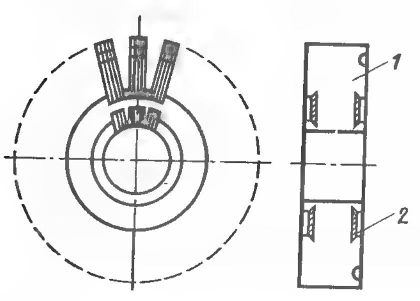


Рис. 9.51. Дополнительная часть ротора самотормозящегося АД:

1 – стальная пластина; *2* – алюминиевое U-образное крепящее кольцо

замкнутого кольца уменьшается, поэтому удержание вставки в притянутом к торцу ротора положении осуществляется в основном за счет основного магнитного потока, приходящегося на дополнительную часть ротора. Этот поток из-за прокладки *3* и отсутствия спинки вынужден замыкаться по вставке *4*, т.е. он участвует в создании вращающего момента и одновременно обеспечивает растормаживание АД. Этим и объясняется, что энергетические и пусковые показатели рассматриваемого самотормозящегося АД находятся на уровне АД основного исполнения.

При снятии напряжения с обмотки статора исчезают магнитный поток и электромагнитная сила, удерживающая вставку в притянутом положении; под действием пружины *9* происходит затормаживание АД.

Результаты исследований и промышленных испытаний опытных образцов АД со вставкой на роторе свидетельствуют о том, что данный тип АД с ЭМТУ наиболее полно удовлетворяет вышеизложенным требованиям. Основным достоинством этих АД является компактность (АД со вставками на роторе могут быть созданы в габаритах основного исполнения, рис. 9.52), они не нуждаются в дополнительных электромеханических устройствах (в электромагнитах, конденсаторах и т.д.), имеют высокую надежность (детали тормоза без замены обеспечивают 3–4 млн. срабатываний при вероятности безотказной работы 0,98).

Важным достоинством АД со вставкой на роторе является то, что на базе рассматриваемой конструкции можно создать АД с тормозом-вентилятором, обеспечивающим его охлаждение и работающим в повторно-кратковременном режиме не только в рабочем цикле, но и в паузах, когда АД отключен от сети (рис. 9.53). Это позволяет без изменения габаритов увеличить мощность АД на 35–36%. В качестве примера в табл. 9.35 приведены основные технические данные четырехполюсных АД с высотами оси вращения 112 и 80 мм с электромагнитной вставкой на роторе, с тормозом-вентилятором и без него.

В табл. 9.36 приведено сравнение параметров АД серии АИ с двигателями инофирм. Из табл. 9.35 и 9.36 видно, что рассматриваемые самотормозящиеся АД по техническому уровню значительно превосходят известные конструкции АД с ЭМТУ.

Требования, предъявляемые к созданию АД с ЭМТУ серии АИ, предписывают практически полное использование деталей АД основного исполнения. В самотормозящихся АД коэффициент унификации с основным АД равен 0,93, поэтому было принято решение, допускающее изготовление на базе серии АИ, как один из вариантов, АД со вставкой на роторе.

Использование для серии АИ пристраиваемых либо автономных тормозов позволяет значительно уменьшить трудоемкость изготовления АД с ЭМТУ, так как в этом случае и АД, и ЭМТУ могут изготовляться на специализированном высокопроизводительном автоматизированном оборудовании. Поэтому основная задача при создании ЭМТУ заключалась

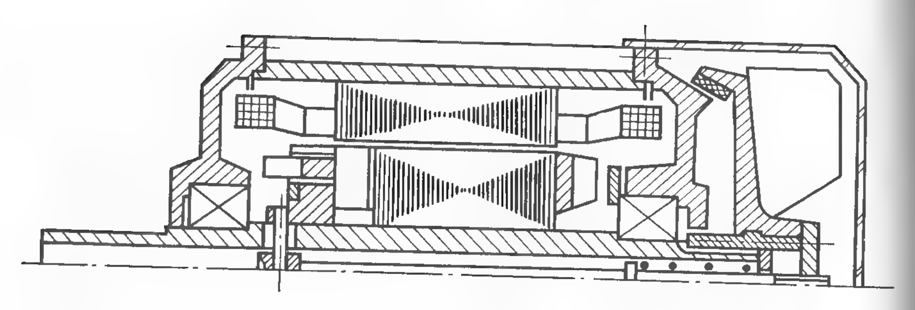


Рис. 9.52. Самотормозящийся АД с электромагнитной вставкой на роторе и полым валом

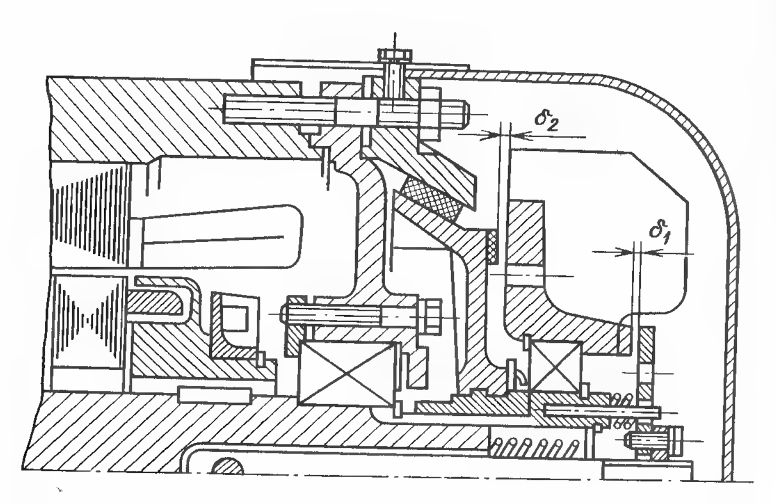


Рис. 9.53. Самотормозящийся АД, снабженный тормозом-вентилятором

Таблица 9.35

Параметры	Самотормозящиеся АД с электромагнитной вставкой			
	без тормоза-вентилятора		с тормозом-вентилятором	
Номинальная мощность, кВт	5,5	1,5	7,5	2,2
Тормозной момент, Н·м	90	25	100	27
Время включения, мс	10	10	10	10
Мощность, потребляемая тормозом, Вт	110	40	125	50
Масса тормозного устройства, кг	4,5	1,5	6,5	2,5
Масса АД с тормозным устройством, кг	60	20,5	62	21,5
Длина АД с тормозом, мм	515	340	515	340

в уменьшении его массы (при сохранении заданного быстродействия), а главное – в уменьшении высоты электромагнита до размеров, позволяющих разместить ЭМТУ на участке вала, предназначенном для установки вентилятора.

Известны два пути повышения быстродействия и уменьшения массы ЭМТУ: во-первых, за счет правильного выбора конструкции и оптимального проектирования электромагнитов, во-вторых, за счет использования специальных схем включения ЭМТУ.

Первый путь позволяет только частично решить поставленную задачу, более универсальным является второй путь. Он связан с применением схем, обеспечивающих ускоренное (форсированное) срабатывание ЭМТУ при включении.

В подобных схемах к электромагниту на интервале его срабатывания подводится мощность в несколько раз больше той, которая потребляется электромагнитом в номинальном режиме (при притянутом якоре). Для этого кратковременно увеличивают ток в катушке либо напряжение, приложенное к ней. В любом случае коэффициент форсировки $k_ф$, характеризующий изменение МДС электромагнита в процессе форсировки, равен

$$k_ф = F_ф/F_{уд},$$

где $F_ф$ и $F_{уд}$ – МДС форсировки и МДС удержания якоря электромагнита в притянутом состоянии.

Проведенные расчеты и исследования показывают, что для решения поставленной задачи по уменьшению массы ЭМТУ в 3–5 раз необходимо создать электромагниты с коэффициентом форсировки (коэффициентом усиления), равным 15–25, при этом в расчетах электромагнитов с форсировкой должны использоваться не традиционные критерии оптимальности (минимум объема, массы, потребляемой энергии, максимум тягового усилия, быстродействия, магнитной или механической эффективности и т.д.), а критерий минимума высоты электромагнита.

Из большого разнообразия возможных решений по созданию схем управления ЭМТУ с форсированным пуском наиболее полно предъявляемым требованиям удовлетворяют схемы управления с конденсатором, а также тиристорные схемы управления электромагнитами пульсирующего тока. В последних схемах ограничение тока электромагнита в номинальном режиме осуществляется методом фазового управления (рис. 9.54).

В номинальном режиме тиристор отпирается в конце каждого положительного полупериода сети переменного тока, пропуская на обмотку электромагнита лишь небольшие импульсы напряжения (рис. 9.55). Период импульсного напряжения на обмотке электромагнита равен периоду сети переменного тока. Каждый период можно разбить на два интервала. Первый интервал соответствует открытому состоянию тиристора. В соответствии с рис. 9.55 на первом интервале имеет место

Таблица 9.36

Параметры	Страна, фирма, тип АД с ЭМТУ								
	СССР						ФРГ, Siemens		
	АИР132М4	АИР112М4	АИР80В4	АИР132М4	АИР112М4	АИР80В4	1LC3166-4DC	1LC3130-4AC	1LC3098-4AC
	Пристроенный тормоз				Автономный тормоз		Встроенный тормоз		
Номинальная мощность, кВт	11	5,5	1,5	11	5,5	1,5	11	5,5	1,5
Максимальный тормозной момент, Н·м	180	90	30	180	90	30	200	51	20
Время включения, мс	10	10	10	10	10	10	200	50	45
Мощность, потребляемая ЭМТУ, Вт	7	4	3	7	4	3	176	205	155
Масса ЭМТУ, кг	7,5	4,8	1,7	9	5,8	2,6	48	13	7,2
Длина двигателя с ЭМТУ, мм	530	462	350	610	525	375	782	500	384

Таблица 9.36 (продолжение)

Параметры	Страна, фирма, тип АД с ЭМТУ										
	Швейцария, BBC			ФРГ, AEG	ФРГ, AEG	Швеция, ASEA			ФРГ, Binder		
	JAQU132SB4A5	JAQU90LB4A2,5	AMBX160MR4	AMBX132SR4	AMBX90LX4	MR160M	MBLR132S	MTR90L	24в	19с	13с
	Встроенный тормоз								Автономный тормоз		
Номинальная мощность, кВт	5,5	1,5	11	5,5	1,5	11	5,5	1,5	11	5,5	1,5
Максимальный тормозной момент, Н·м	50	25	150	60	32	250	100	20	200	100	25
Время включения, мс	–	–	–	–	–	160	110	50	195	285	130
Мощность, потребляемая ЭМТУ, Вт	48	39	–	–	–	210	110	80	100	70	35
Масса ЭМТУ, кг	29	17	21	14	6,5	50	28	8,5	28	13	5
Длина двигателя с ЭМТУ, мм	586	428	674	535	389,5	752	588	395	–	–	–

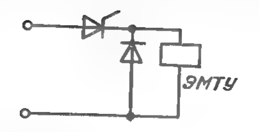


Рис. 9.54. Принципиальная схема фазового управления тормозным устройством

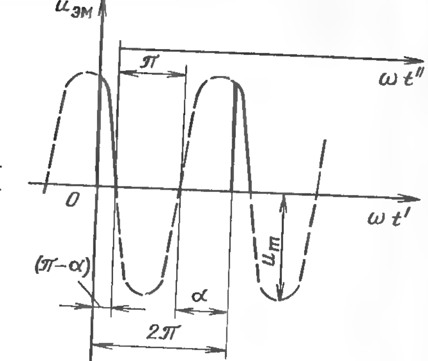


Рис. 9.55. Напряжение на обмотке электромагнита при фазовом управлении тормозным устройством

соотношение

$$0 \leqslant \omega t' \leqslant (\pi - \alpha),$$

где $\omega = 2\pi f$; f – частота сети; α – угол управления тиристором в номинальном режиме; t' – время, отсчитываемое с начала первого интервала.

На первом интервале ток электромагнита равен току тиристора. Уравнение равновесия напряжений на обмотке электромагнита для первого интервала запишем в виде

$$U_m \sin(\omega t' + \alpha) = Ri_{\text{т}} + L\frac{di_{\text{т}}}{dt}, \qquad (9.57)$$

где $U_m = U\sqrt{2}$; R, L – активное сопротивление и индуктивность электромагнита в номинальном режиме; $i_{\text{т}}$ – ток тиристора; U – действующее значение синусоидального напряжения сети.

Решение этого уравнения относительно тока имеет вид

$$i_{\text{т}} = \frac{U_m}{R\sqrt{1+D^2}} \sin(\omega t' + \alpha - \varphi) + Ae^{-\omega t/D}, \qquad (9.58)$$

где $\varphi = \operatorname{arctg} D$; $D = \omega\tau$; $\tau = L/R$; A – постоянная интегрирования.

На втором интервале тиристор закрыт. В соответствии с рис. 9.57 на втором интервале имеет место соотношение

$$0 \leqslant \omega t'' \leqslant \pi + \alpha,$$

где t'' – время, отсчитываемое с начала второго интервала.

На втором интервале ток электромагнита равен току диода, шунтирующего обмотку электромагнита.

Уравнение равновесия на обмотке электромагнита для второго интервала запишем в виде

$$0 = Ri_{\text{ш}} + L\frac{di_{\text{ш}}}{dt}, \qquad (9.59)$$

где $i_{\text{ш}}$ – ток шунтирующего диода.

Решение этого уравнения относительно тока имеет вид

$$i_{\text{ш}} = Be^{-\omega t''/D}, \qquad (9.60)$$

где B – постоянная интегрирования.

На границах интервалов справедлива следующая система уравнений:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{U_m}{R\sqrt{1+D^2}} \sin(\alpha - \varphi) + A = Be^{-(\pi+\alpha)/D}; \\ &\frac{U_m}{R\sqrt{1+D^2}} \sin\varphi + Ae^{-(\pi+\alpha)/D} = B. \end{aligned}\right\} \qquad (9.61)$$

Решив полученные уравнения относительно постоянных интегрирования, запишем

$$A = \frac{U_m}{R\sqrt{1+D^2}} \frac{\sin\varphi e^{-(\pi+\alpha)/D} - \sin(\alpha-\varphi)}{1 - e^{-2\pi/D}}; \qquad (9.62)$$

$$B = \frac{U_m}{R\sqrt{1+D^2}} \frac{\sin\varphi - \sin(\alpha-\varphi) e^{-(\pi-\alpha)/D}}{1 - e^{-2\pi/D}}. \qquad (9.63)$$

Тогда соотношения для токов будут иметь вид

$$i_{\text{т}} = \frac{U_m}{R\sqrt{1+D^2}} \left[\sin(\omega t' + \alpha - \varphi) + \frac{\sin\varphi e^{-(\pi+\alpha)/D} - \sin(\alpha-\varphi)}{1 - e^{-2\pi/D}} e^{-\omega t'/D} \right]; \qquad (9.64)$$

$$i_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{ш}}}{R\sqrt{1+D^2}} \frac{\sin\varphi - \sin(\alpha-\varphi) e^{-(\pi-\alpha)/D}}{1 - e^{-2\pi/D}} e^{-\omega t''/D}. \qquad (9.65)$$

В начале первого интервала ($\omega t' = 0$) или в конце второго ($\omega t'' = \pi + \alpha$) ток электромагнита будет минимальным:

$$I_{min} = \frac{U_m}{R\sqrt{1+D^2}} \frac{\sin\varphi e^{-(\pi+\alpha)/D} - \sin(\alpha-\varphi) e^{-2\pi/D}}{1 - e^{-2\pi/D}}. \qquad (9.66)$$

В конце первого интервала $(\omega t' = \pi - \alpha)$ или в начале второго $(\omega t'' = 0)$ ток электромагнита определяется соотношением

$$I_{max} = \frac{U_m}{R\sqrt{1 + D^2}} \frac{\sin\varphi - \sin(\alpha - \varphi)e^{-(\pi - \alpha)/D}}{1 - e^{-2\pi/D}} . \qquad (9.67)$$

Таким образом, в номинальном режиме ток электромагнита пульсирует от I_{min} до I_{max} .

Следует отметить, что на втором интервале происходит экспоненциальное затухание тока с постоянной времени электромагнита τ. Поэтому для устранения обесточивания электромагнита в конце второго интервала и вибрации якоря значение постоянной времени электромагнита должна ограничиваться снизу:

$$\tau > \frac{\pi + \alpha}{(3 \div 5)\,\omega} ,$$

где угол управления тиристором α может находиться в диапазоне $0 < \alpha < \pi$.

Для случаев, где угол α близок к π, можно использовать приближенное соотношение:

$$\tau > \frac{1}{(3 \div 5) f} .$$

Следует отметить, что удержание якоря электромагнита в номинальном режиме может быть обеспечено при соотношении

$$I_{min} > I_{уд},$$

где $I_{уд}$ – ток удержания якоря электромагнита в притянутом состоянии.

Далее определим соотношения для средних и действующих значений переменных:

среднее значение напряжения электромагнита

$$U_{эм,ср} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi - \alpha} U_m^2 \sin(\omega t' + \alpha)\, d(\omega t') =$$

$$= \frac{U_m}{\pi} \frac{1 + \cos\alpha}{2} ; \qquad (9.68)$$

среднее значение тока тиристора

$$I_{т,ср} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi - \alpha} i_т\, d(\omega t'); \qquad (9.69)$$

среднее значение тока шунтирующего диода

$$I_{ш,ср} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi + \alpha} i_ш\, d(\omega t''); \qquad (9.70)$$

среднее значение тока электромагнита

$$I_{эм,ср} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\pi - \alpha} i_т\, d(\omega t') + \int_0^{\pi - \alpha} i_ш\, d(\omega t'') \right] =$$

$$= \frac{U_m}{\pi R} \frac{1 + \cos\alpha}{2} ; \qquad (9.71)$$

среднее за период значение мощности

$$P_{ср} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi - \alpha} U_m \sin(\omega t' + \alpha)\, i_т d(\omega t'); \qquad (9.72)$$

действующее значение напряжения электромагнита

$$U_{эм} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi - \alpha} U_m^2 \sin^2(\omega t' + \alpha)\, d(\omega t')} =$$

$$= \frac{U_m}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi}} ; \qquad (9.73)$$

действующее значение тока тиристора

$$I_т = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi - \alpha} i_т^2\, d(\omega t')}; \qquad (9.74)$$

действующее значение тока шунтирующего диода

$$I_ш = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi - \alpha} i_ш^2\, d(\omega t'')} ; \qquad (9.75)$$

действующее значение тока электромагнита

$$I_{эм} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\pi - \alpha} i_т^2\, d(\omega t') + \int_0^{\pi + \alpha} i_ш\, d(\omega t'') \right]} . \qquad (9.76)$$

Сопоставляя три последних соотношения, можно установить:

$$I_{эм} = \sqrt{I_т^2 + I_ш^2} . \qquad (9.77)$$

Следует отметить, что развернутые соотношения в общем виде для токов и мощности довольно громоздки. Поэтому были получены упрощенные, приближенные соотношения для этих величин при допущении бесконечно большой добротности электромагнита D, которое эквивалентно общепринятому допущению бесконечно большой индуктивности активно-индуктивной нагрузки диода. Упрощенные соотношения были получены из общих путем предельного перехода в виде

$$I_{эм} \approx I_{эм,ср} = \frac{U_m}{\pi R}\ \frac{1 + \cos\alpha}{2}\ ; \tag{9.78}$$

$$P_{ср} \approx RI^2_{эм}\ ; \tag{9.79}$$

$$I_{т,ср} \approx I_{эм}\frac{\pi-\alpha}{2\pi}\ ;\quad I_{ш,ср} \approx I_{эм}\frac{\pi+\alpha}{2\pi}\ ; \tag{9.80}$$

$$I_{т} \approx I_{эм}\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{2\pi}}\ ;\quad I_{ш} \approx I_{эм}\sqrt{\frac{\pi+\alpha}{2\pi}}\ . \tag{9.81}$$

Эти упрощенные соотношения могут быть получены и более простым путем. Для этого воспользуемся уравнением равновесия напряжения электромагнита

$$\frac{u_{эм}}{L} = \frac{R}{L}\,i_{эм} + \frac{di_{эм}}{dt}\ , \tag{9.82}$$

откуда при допущении $L \to \infty$ получаем

$$di_{эм}/dt = 0.$$

Это равенство показывает, что допущение бесконечно большой добротности или индуктивности соответствует допущению неизменности тока электромагнита. Постоянному току электромагнита соответствуют постоянные токи тиристора и шунтирующего диода на соответствующих интервалах периода сети. Соотношение между средними значениями тока тиристора и тока шунтирующего диода в соответствии с их исходными выражениями в этом случае равно

$$\frac{I_{т,ср}}{I_{ш,ср}} \approx \frac{\int\limits_0^{\pi-\alpha} d(\omega t')}{\int\limits_0^{\pi+\alpha} d(\omega t'')} = \frac{\pi-\alpha}{\pi+\alpha}\ . \tag{9.83}$$

В общем случае имеет место равенство

$$I_{т,ср} + I_{ш,ср} = I_{эм}\ . \tag{9.84}$$

С учетом двух последних соотношений нетрудно определить упрощенные выражения для $I_{т,ср}$ и $I_{ш,ср}$, приведенные выше.

Аналогично, использовав исходные выражения для действующих значений токов, запишем

$$\frac{I_т}{I_ш} \approx \sqrt{\frac{\pi-\alpha}{\pi+\alpha}}\ ; \tag{9.85}$$

$$I_{эм} = \sqrt{I^2_т + I^2_ш}\ , \tag{9.86}$$

откуда нетрудно перейти к упрощенным соотношениям для $I_т$ и $I_ш$, указанным выше.

Приведенные соотношения позволяют определить средние и действующие значения переменных и при кратковременных рабочих перегрузках (режим форсировки). Для этого нужно принять в формулах $\alpha \to 0$;

$$\left.\begin{aligned} &U_{эм,ср0} = U_m/\pi;\quad I_{эм,ср0} = U_m/\pi R;\quad U_{эм0} = U_m/2;\\ &P_{ср0} = U^2_m/(\pi^2 R);\quad I_{т,ср0} = I_{ш,ср0} \approx\\ &\approx U_m/(2\pi R);\quad I_{т0} = I_{ш0} \approx U_m/(\sqrt{2}\pi R), \end{aligned}\right\} \tag{9.87}$$

откуда можно определить коэффициент форсировки (усиления) электромагнита по напряжению как отношение средних значений:

$$k_ф = U_{эм0}/U_{эм} = 2/(1 + \cos\alpha)\ . \tag{9.88}$$

Осциллограммы тока в катушке электромагнита при включении и отключении приведены на рис. 9.56.

Соотношения для максимальных значений обратного и прямого напряжений тиристоров и шунтирующего диода имеют вид

$$U_{т,пр} = U_{т,обр} = U_{ш,обр} = U_m\ .$$

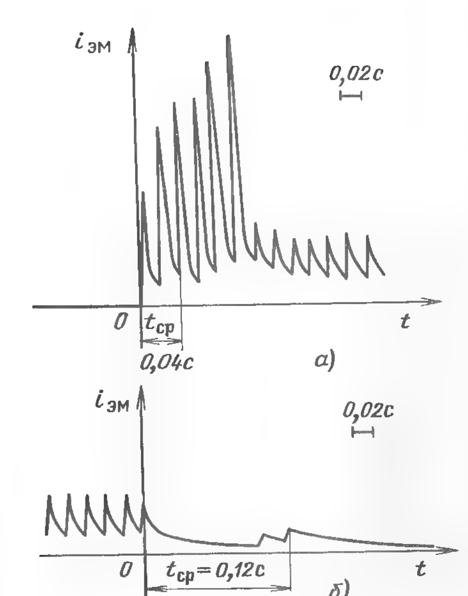


Рис. 9.56. Осциллограммы тока в катушке электромагнита при включении (*а*) и отключении (*б*)

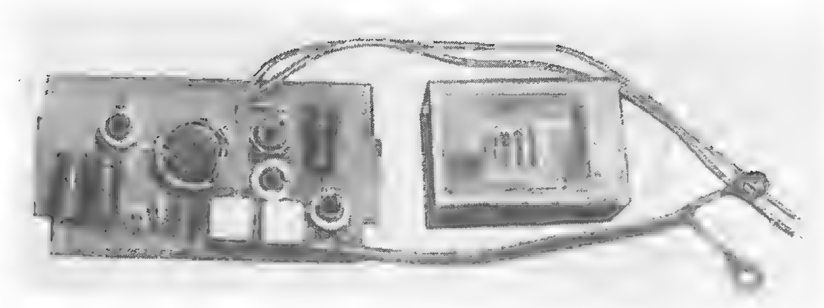


Рис. 9.57. Схема форсировки с фазовым управлением

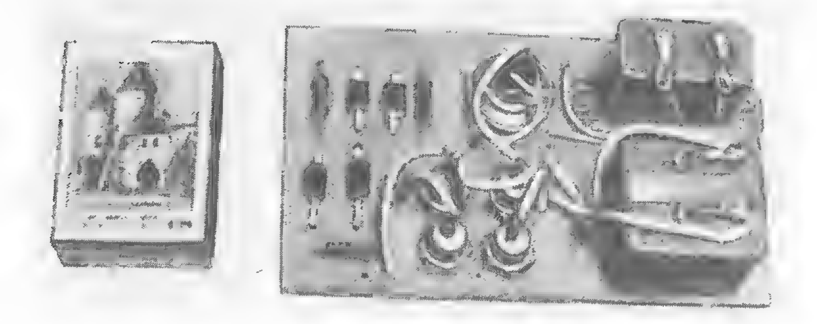


Рис. 9.58. Схема форсировки с предвключенным конденсатором

Аналогичным образом были получены соотношения для коэффициента форсировки и токов в схеме с включенным конденсатором.

На основании этих аналитических выражений для АД серии АИ с высотами оси вращения 56–160 мм были разработаны два блока управления ЭМТУ (рис. 9.57, 9.58), позволившие по сравнению с известными конструкциями в несколько раз уменьшить массу и потребляемую мощность ЭМТУ.

Блок управления тормозом имеет свой корпус и предназначен для расположения в шкафу управления АД. В конструкции самого тормоза, пристраиваемого к АД серии АИ, принципиально новых решений практически нет. Он состоит из известных деталей и узлов, работоспособность которых проверена многолетней практикой эксплуатации во многих странах. Общий вид двигателя с ЭМТУ представлен на рис. 9.59. Продольный разрез электромагнитного тормоза, пристроенного к подшипниковому щиту АД, показан на рис. 9.60.

Стальной магнитопровод *2* прикреплен к станине *1* АД. Неподвижный тормозной диск *6* с помощью трех болтов через регулировочные дистанционные шайбы *4* закреплен на магнитопроводе *2*.

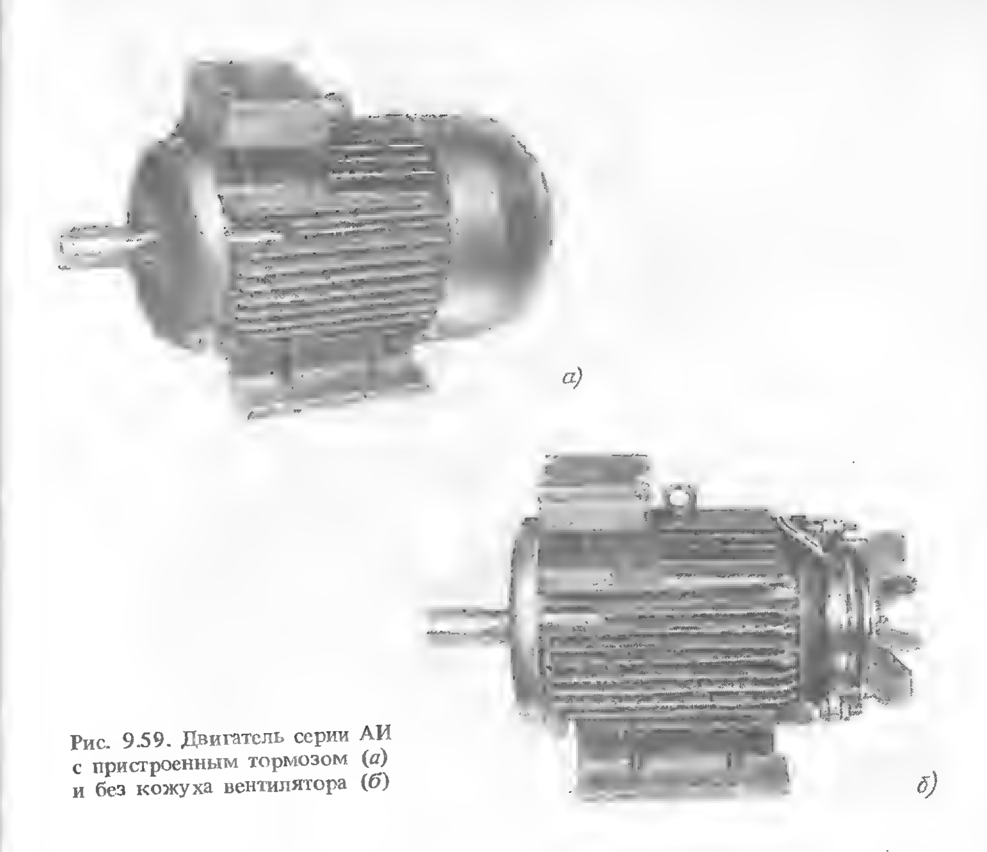


Рис. 9.59. Двигатель серии АИ с пристроенным тормозом (*а*) и без кожуха вентилятора (*б*)

На валу *10* серийного АД установлена втулка *9*, снабженная шлицами; от осевого смещения она закреплена стопорным винтом. На втулке *9* размещен вращающийся тормозной диск *5*, который может перемещаться аксиально. Якорь электромагнита *3*, поджимаемый к тормозному диску *5* пружинами *14*, свободно перемещается на штифтах, запрессованных в магнитопровод *2*. В кольцевую канавку на втулке *9* установлено пружинное кольцо, в которое упирается шайба *8*. Пружины *12*, размещенные в гнездах тормозного диска *5*, упираясь в шайбу *8*, стремятся сдвинуть тормозной диск влево до тех пор, пока винт *11* не упрется в торец вала *10*. Это позволяет при включенном АД обеспечивать требуемый зазор δ_2. Начальный зазор δ_1 устанавливается с помощью дистанционных шайб *4*. Регулировка тормозного момента может производиться ступенчато – за счет установки различного количества пружин *14*, число которых может быть 3–6–9, а также плавно – за счет регулировочных винтов *13*. Вентилятор *7* с помощью винтов прикреплен к ступице тормозного диска *5* и имеет в центре резьбовое отверстие для регулировочного винта *11*.

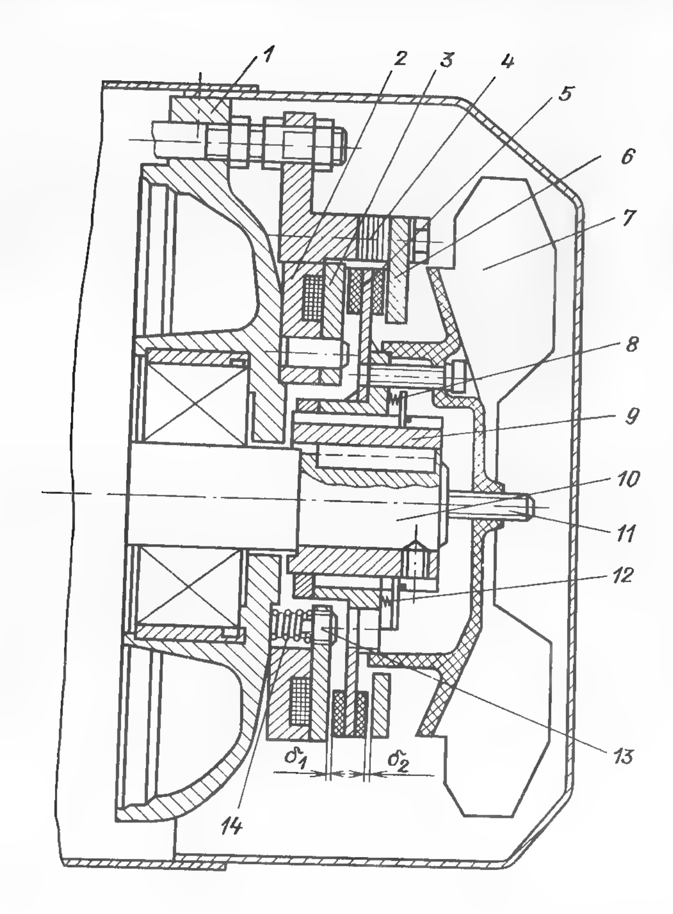


Рис. 9.60. Пристроенный электромагнитный тормоз для АД серии АИ

Принцип работы АД с ЭМТУ заключается в следующем: при пуске одновременно на обмотку АД и обмотку электромагнита через схему управления подается напряжение сети, под действием форсированной МДС якорь *4* электромагнита, преодолевая действие возвратных пружин *14*, в течение 0,01–0,04 с притягивается к сердечнику магнитопровода, растормаживая вал АД.

При снятии напряжения с обмоток статора и ЭМТУ исчезает электромагнитная сила, удерживающая якорь *3* в притянутом к магнитопроводу *2* положении. Последний под действием возвратных пружин *14* смещается вправо и прижимает тормозные колодки вращающегося диска *5* к неподвижному диску *6*, обеспечивая быстрое торможение вала двигателя.

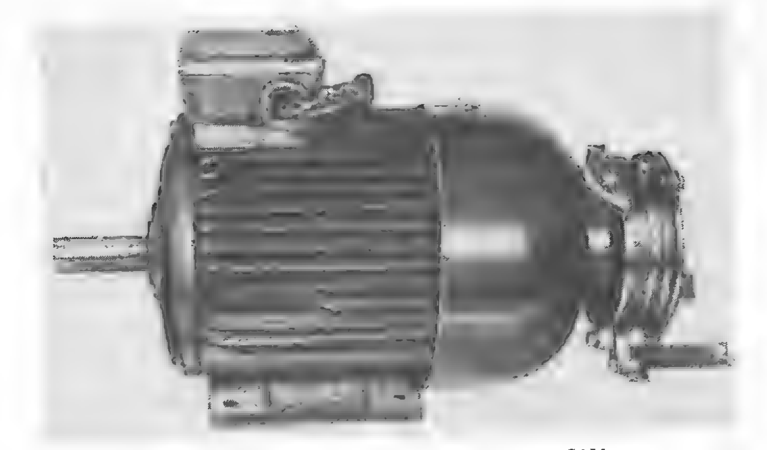


Рис. 9.61. Двигатель с автономным тормозом

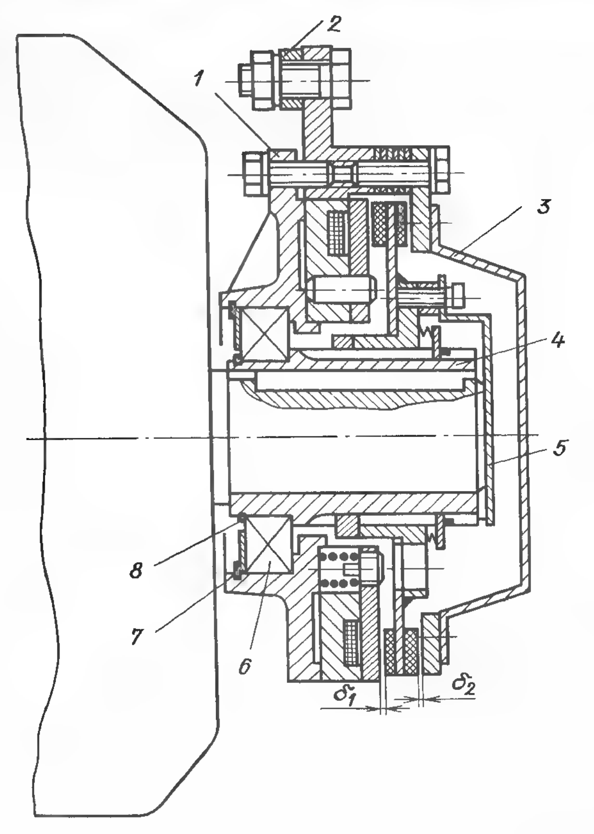


Рис. 9.62. Автономный тормоз для АД серии АИ с двумя свободными концами вала

На базе рассмотренной конструкции пристраиваемого ЭМТУ разработано также и автономное тормозное устройство с двумя плоскостями трения. Оно может быть использовано для обычных серийных АД с двумя свободными концами вала (рис. 9.61).

В этой конструкции (рис. 9.62) основные детали (магнитопровод, якорь, катушка, тормозные диски, пружины и т.д.) заимствованы из конструкции пристроенного тормоза. Дополнительно изготовляются только переходник *1*, тяги *2*, защитный колпак *3*, шлицевая втулка *4*, упор *5*, кольца пружинные *7, 8*; в переходной крышке *1* монтируется подшипник *6*.

Применение этих дополнительных деталей и установка радиально-упорного подшипника между переходной крышкой *1* и шлицевой втулкой *4* позволяет устанавливать тормоз непосредственно на вал серийного АД или любого другого АД.

Принцип работы автономного тормоза аналогичен принципу работы пристроенного ЭМТУ, изображенного на рис. 9.60. Однако для осуществления торможения магнитопровод должен быть зафиксирован от проворота посредством тяги *2*, один конец которой шарнирно закреплен на магнитопроводе, а второй — на неподвижной опоре вне тормоза (станина станка, корпус двигателя, корпус стали и пр.). По усмотрению заказчиков вместо тяг *4* может быть использован любой рычаг.

9.9. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ МОДИФИКАЦИИ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Двигатели специализированных модификаций предназначены для работы в условиях воздействия климатических факторов внешней среды по СТ СЭВ 458-77.

Двигатели химостойкого исполнения должны быть стойкими к воздействию агрессивных сред.

Тропические двигатели имеют исполнения Т1 (сухие тропики) и Т2 (влажные тропики) и должны выдерживать:

статическое воздействие пыли с размером частиц до 50 мкм;

динамическое воздействие пыли (только для Т1) составом до 70% кварцевого песка с размером частиц до 200 мкм при скорости до 15 м/с;

действие солнечной радиации (только для Т1) с интенсивностью теплового потока 1125 Вт/м^2, в том числе при плотности ультрафиолетовой части спектра (длина волн 280–400 нм) 68 Вт/м^2;

воздействие плесневых грибков.

Двигатели специализированных модификаций по условиям окружающей среды изготовляются только в исполнении IP54 и имеют увязку рядов мощностей и установочных размеров такую же, как и для основного исполнения.

Конструкция АД этих исполнений отличается от основного исполнения, как правило, только материалами пропитки и покрытий, маркой пластмассы.

Пропиточные лаки и покровные эмали, как правило, выполнены на основе эпоксидных смол.

9.10. ДВИГАТЕЛИ МАЛОШУМНЫЕ, ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ ПО УСТАНОВОЧНЫМ РАЗМЕРАМ, ВЫСОКОТОЧНЫЕ

Двигатели этих исполнений по увязке мощностей и установочных размеров и по всем остальным параметрам должны соответствовать требованиям, предъявляемым к основному исполнению.

Двигатели малошумного исполнения изготовляются с высотами оси вращения от 45 до 180 мм (вариант увязки Р) и от 56 до 200 мм (вариант увязки С).

Значение уровня шума этих АД в режиме холостого хода должно быть на 5 дБ ниже, чем АД основного исполнения соответствующих типоразмеров.

Для АД малошумного исполнения допускается снижение кратности моментов при сохранении мощности АД и снижение мощности АД при сохранении кратности моментов по сравнению с соответствующими АД основного исполнения. Снижение уровня шума в АД малошумного исполнения достигается применением высокоточных подшипников, повышением класса механической обработки и в некоторых случаях — снижением электромагнитных нагрузок.

Двигатели повышенной точности по установочным размерам могут быть выполнены на базе основного исполнения N3, а также модификаций: с температурной защитой, с повышенным скольжением, многоскоростные, тропического исполнения Т3.

Двигатели высокой точности по установочным размерам могут быть выполнены на базе основного исполнения N 4, а также тропического исполнения Т4.

Предельные отклонения установочных размеров АД повышенной и высокой точности должны соответствовать определенному классу по СТ СЭВ 4435-83, СТ СЭВ 4436-83.

Значения вибрационной скорости АД не должны превышать указанных ниже:

Высота оси вращения, мм	Виброскорость АД повышенной точности, м/с	Виброскорость высокоточных АД, м/с
56–71	0,71	0,45
80–132	1,12	0,71
160–225	1,80	1,12
250–355	2,80	1,80

Повышение точности по установочным размерам и снижение вибраций достигается повышением точности механической обработки, применением высокоточных подшипников, повышением уровня динамической балансировки роторов и вентилятора.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДВИГАТЕЛЕЙ АИ

10.1. ОСНОВНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ

Современное предприятие представляет собой единый комплекс из отдельных машин и групп машин, перерабатывающих исходные материалы в детали, узлы и готовую продукцию, пронизанный транспортными системами, перемещающими материалы, полуфабрикаты и готовую продукцию, а также системами передачи информации, связанными с устройствами для ее переработки и выдачи управляющих решений и воздействий. Необходимое условие нормального функционирования предприятия — наличие служб, поддерживающих в работоспособном состоянии отдельные элементы и комплекс в целом. Цель "комплексной технологии" — сведение к экономически целесообразному минимуму численности всего персонала предприятия (в идеале — к "безлюдной технологии"). Такая концепция существенно расширяет понятие "технология", в которое ранее включались только собственно процессы обработки деталей и узлов в рабочих органах оборудования. Высокая численность промышленно-производственного персонала на многих электромашиностроительных предприятиях является следствием некомплексного подхода к проблеме производительности труда, вследствие чего снижение трудоемкости на основных технологических переделах не сопровождается существенным уменьшением общей численности работающих.

В табл. 10.1 приведены структура и численность промышленно-производственного персонала в СССР по категориям и видам работ при производстве АД серии 4А.

В рамках "комплексной технологии" серии АИ задача общего повышения производительности труда решается переходом на технологическое оборудование следующего поколения: автоматизированные технологические комплексы (АТК), автоматизированные транспортно-складские комплексы (АТСК) и интегрированные организационно-технологические системы управления предприятием (АСУ ОТ). Реализация комплексной технологии позволяет резко снизить численность персонала, занятого на транспорте, погрузоразгрузочных, складских, контрольных операциях, а также ИТР и служащих. Существенно уменьшается и числен-

Таблица 10.1

Промышленно-производственный персонал (ППП)	Удельный вес, % к численности ППП	Удельный вес вида работ, %
Всего	100	–
В том числе:		
инженерно-технические работники (ИТР)	17,5	–
служащие	3,1	–
рабочие	79,4	–
Основные рабочие	40,3	100
Из них по видам работ:		
литейные процессы	7,4	12,4
кузнечно-штамповочные работы	2,1	6,5
изготовление деталей из пластмасс	1	2,2
механическая обработка	6,6	16,9
слесарно-сборочные и слесарные	10,1	27,7
обмоточные, изоляционные, пропиточные	8,2	24,8
сварочные, газорезные	1,2	2,8
термические	0,4	2,2
производство покрытий	2	5,4
деревообработка	0,1	0,4
Вспомогательные рабочие	39,1	100
Из них по функциональным группам:		
транспортные и погрузоразгрузочные операции	7,8	18,8
приемка, хранение и выдача материала	4,5	10,8
энергоснабжение	4,1	9,7
поддержание в рабочем состоянии оборудования и аппаратуры	5,5	13,1
изготовление и поддержание в рабочем состоянии инструмента и технологической оснастки	4,9	11,7
контрольные операции	4,7	11,3
наладка оборудования	2	4,7
поддержание в рабочем состоянии зданий и сооружений	1,4	3,4
работы по уборке производственных помещений	1,9	4,5
прочие работы	2,3	12

ность рабочих на основных технологических передачах, и в первую очередь на обмоточно-изоляционных и сборочных операциях.

АТК представляет собой по существу мини-завод, выпускающий детали и узлы АД. Производством внутри АТК управляют локальные системы управления производством (АСУ П) и технологическими процессами (АСУ ТП). АТК снабжен микро-ЭВМ, с помощью которой осуществляется его связь с АТСК, другими АТК и высшими иерархическими ступенями АСУ ОТ. Так, АТК для изготовления обмотанного

сердечника статора представляет собой единую автоматизированную линию, в которой посредством транспортной системы, снабженной роботами и манипуляторами, объединены технологические процессы изолировки пазов, укладки обмотки, сборки схемы, бандажировки, пропитки и испытания обмотанного статора. На входе и выходе АТК имеет роботизированную связь с автоматизированным транспортно-складским комплексом. Следует подчеркнуть, что если преобразование автоматических линий для механообработки деталей АД в автоматизированные технологические комплексы связано по существу только с устройством роботизированных входов и выходов на автоматизированный транспортно-складской комплекс и оснащением линии микро-ЭВМ для информационной связи с АТСК и АСУ ОТ, то создание АТК для производства обмотанных статоров и АТК для сборки АД представляет собой революционный шаг в технологии специфических процессов.

Стержнем всего технологического процесса производства АД становится АТСК, состоящий из системы автоматизированных складов и конвейеров толкающего типа с автоматическим адресованием грузов и имеющий роботизированные выходы на все АТК и внешние транспортные связи. АТК и АТСК объединяются в единый технологический комплекс интегрированной организационно-технологической системой управления предприятием АСУ ОТ, которая представляет собой иерархическую трехуровневую систему управления и решает большинство задач, связанных с управлением основным и вспомогательным производством. Кроме задачи охвата "от ворот до ворот" единой системой механизированных и автоматизированных устройств всего грузопотока основных материалов, деталей, узлов и готовой продукции на транспортно-складской комплекс возлагаются функции рабочего органа АСУ ОТ, управляющего по заданному закону запасами материалов и полуфабрикатов, подачей их на АТК и приемом с АТК отработанных деталей и узлов, снабжением ими сборочных АТК и отгрузкой готовой продукции. Производительность всех АТК кратна между собой, а сами они являются типовыми или собираются из типовых модулей. АТСК также собираются из типовых модулей.

Параметры типовой технологической линии на основе АТК по выпуску АД серии АИ с высотой оси вращения 112 мм приведены в табл. 10.2. Принятые решения значительно снижают технологическую трудоемкость АД серии АИ по сравнению с трудоемкостью АД серии 4А (табл. 10.3).

Асинхронный двигатель является по существу модульной конструкцией, и в пределах одного габарита из нескольких десятков отдельных деталей и узлов (модулей) собираются тысячи различных исполнений и модификаций. АТК в пределах одного габарита – переналаживаемая система, поэтому в серии АИ производство модификаций технологически обеспечено. Однако для малых партий АД узкоспециализированных исполнений переналадка основных АТК экономически невыгодна.

Таблица 10.2

АТК	Производительность, тыс.шт/год	Количество АТК на линейку
Обработка подшипниковых щитов в составе пяти сверлильно-расточных станков	450	0,5
Обработка вала-ротора	140	2
Обработка станин	225	1
Шихтовка и сварка сердечника статора	225	1
Шихтовка и сварка сердечника ротора	225	1
Изолирование обмотки, пропитка, испытание обмотки статора	225	1
Сборка и испытание двигателей	225	1
Тепловая сборка ротора с валом	150	2
Балансировка роторов	225	1
Отливка станины	100	3
Заливка роторов	140	2

Таблица 10.3

Высота оси вращения АД, мм	Нормативная трудоемкость АД серии 4А по типовой технологии, нормо-ч	Планируемая трудоемкость АД серии АИ, нормо- ч	
		при обработке по технологии серии 4А	при обработке на АТК
50	1,54	1,74	1,218
56	1,282	1,449	1,014
63	1,305	1,475	1,032
71	1,6	1,808	1,266
80	1,732	1,957	1,37
90	1,936	2,188	1,532
100	2,122	2,398	1,679
112	2,925	3,305	2,313
132	3,434	3,88	2,716
160	6,734	7,609	2,324
180	7,642	8,635	6,044
200	10,224	12,167	8,517
225	12,51	14,887	10,421
250	15,134	18,009	12,606

Выпуск деталей для таких АД предусматривается на гибких АТК (ГАТК), управляемых АСУ ОТ и состоящих из станков с ЧПУ или обрабатывающих центров, связанных транспортной системой и имеющих роботизированные выходы на АТСК. Массовость производства обусловила ориентацию АТК, как правило, на выпуск деталей, узлов и АД одного габарита. Однако колебания структуры спроса на АД разных габаритов можно перекрыть созданием гибких автоматизированных производств (ГАП), способных выпускать одновременно детали, узлы и АД нескольких смежных габаритов. Производительность таких ГАП будет в несколько раз меньше, чем АТК, а стоимость соответственно выше. Существенно возрастут также себестоимость и цена АД, выпускаемых на ГАП. Экономическая целесообразность создания ГАП, воспринимающих "пиковые нагрузки" колебаний спроса на АД разных габаритов, в настоящее время учитывается при разработке проектов технического перевооружения конкретных предприятий.

Техническое перевооружение литейного производства и инструментальных цехов сопровождается мероприятиями по их специализации и концентрации производства однородных отливок и инструмента.

В производстве АД серии АИ широкое развитие получают ресурсосберегающие технологии:

при штамповке листов магнитопроводов — многорядная штамповка с отрицательными перемычками и фигурный раскрой ленты;

при изготовлении заготовок валов — поперечно-клиновой прокат и радиальная ковка (получат распространение станы прокатки заготовок для полых валов);

при изготовлении статоров АД — обмотка "в развалку";

получение синтетического чугуна переплавкой отходов электротехнической стали.

Ресурсосберегающие технологии дают экономию проката черных металлов 8—10% и медного проката 5—6%. При годовых объемах потребления в сотни тысяч тонн проката черных металлов и десятки тысяч тонн медного абсолютные цифры экономии выглядят весьма внушительно.

10.2. ЧУГУНОЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

В серии АИ чугунные станины применяются в АД с высотами оси вращения 160—250 мм, чугунные щиты — в АД с высотами оси вращения 71—250 мм. Щиты и станины изготовляют на литейных конвейерах и автоматических линиях методом литья, заливая в сырые песчаные формы жидкий металл. Технология и литейное оборудование принципиально не отличаются от принятых для серии 4А. Однако конструктивные особенности станин у АД серии АИ (в основном прилитая коробка выводов) требуют значительного увеличения площадей стержневых отделений. Для изготовления стержней приняты холоднотвердеющие смеси (ХТС), обеспечивающие высокую производительность оборудования при низкой его энергоемкости. Линии для изготовления стержней (рис. 10.1) имеют следующие технические данные:

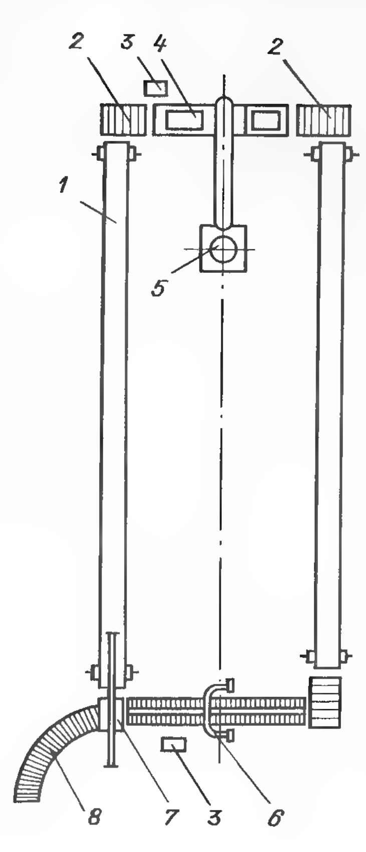


Рис. 10.1. Поточно-механизированная линия для изготовления стержней из ХТС:

1 — ленточный транспортер; *2* — поворотный передающий стол; *3* — пульт управления; *4* — машина для набивки стержня (вибростол); *5* — смеситель непрерывного действия; *6* — кантователь стержневых ящиков; *7* — механизм для захвата и перемещения стержневых ящиков; *8* — гравитационный рольганг

Производительность, съемов/ч	до 40
Габаритные размеры стержневого ящика, мм	600×600×300
Установленная мощность, кВт	30
Расход смеси, не более, кг/ч	3000
Габаритные размеры линии, мм	11500×5950×3060
Способ уплотнения смеси	Вибрационный

Для экономии шихтовых материалов широкое применение найдет синтетический чугун. К синтетическим относятся чугуны, выплавляемые из шихты, содержащей отходы стали (до 90% общей завалки), с доводкой по углероду и кремнию. Необходимым условием применения в шихте отходов электротехнической стали является их предварительное измельчение, обезжиривание и низкотемпературный подогрев (до 250° С). Поскольку синтетический чугун обладает несколько повышенной склонностью к отбелу, его модифицируют. В качестве плавильного оборудования используются индукционные тигельные или канальные печи промышленной частоты типов ИЧТ и ИЧК.

В серии АИ станины из высокопрочных алюминиевых сплавов с прилитым вводным устройством и вертикально-горизонтальным оребрением применяются у АД с высотами оси вращения 50–160 мм, алюминиевые щиты – у АД с высотами оси вращения 50–63 мм. В СССР станины, щиты, клетки роторов производят литьем под давлением на АТК (табл. 10.4).

Таблица 10.4

Модель	Габарит АД, мм	Масса отливки, кг	Производительность, отливки, ч	Габаритные размеры комплекса, м
Автоматизированные комплексы литья станин				
СЭ711Б08	50	0,56		
(исполнение I)	56	0,825	70	6,3×4,47
	63	0,96		
СЭ711Б08	71	1,3	70	6,3×4,47
(исполнение II)	80	2		
СЭ711Б09	90	2,4	60	7,2×5,2
А71111М	100	4	40	
	112	6,4	40	10×8
	132	10	30	
Автоматизированные комплексы литья щитов				
АТ711Б08	50	0,2		
	56	0,25	100	6,3×4
	63	0,3		
Автоматизированные комплексы для заливки роторов				
РЛ-180В	50	0,25	90	
	56	0,3	90	
	63	0,41	80	6,3×4,5
	71	0,57	60	
	80	0,56	60	
	90	0,718	60	
	100	1,404	60	
	112	1,431	55	
	132	2,25	45	
А71111В	160	7,0	50	10×8
(А711А10В)	180	8,0		
А71112К	200	7,98		
	225	11,5	25	12,5×8
	250	16,4		

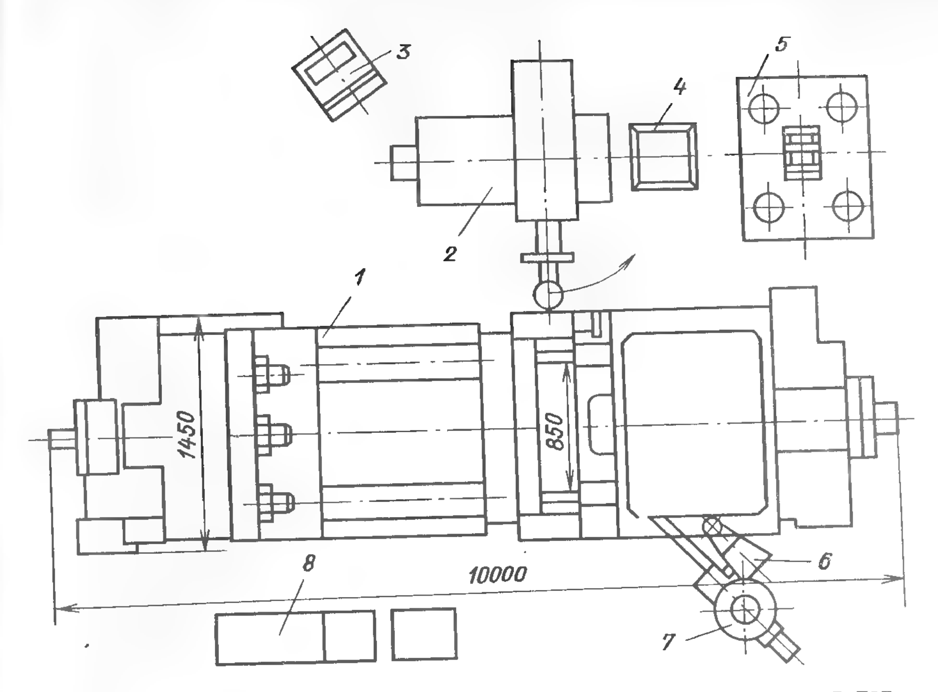


Рис. 10.2. Схема автоматизированного технологического комплекса литья под давлением станин двигателей габаритов 100–112 м:

1 – машина литья под давлением 71111М; *2* – робот (манипулятор) промышленный М20Ц.46.03; *3* – пульт управления промышленным роботом; *4* – установка охлаждения; *5* – гидравлический пресс П60; *6* – робот-заливщик М10Ц.82.06; *7* – раздаточная печь типа ФЕБ-10; *8* – шкафы управления

На рис. 10.2 приведена схема АТК модели А71111М для отливки станин АД с высотами оси вращения 100–132 мм. На АТК в автоматическом режиме могут выполняться следующие операции: нагрев и термостатирование пресс-формы; обдув и смазка пресс-формы и пресс-поршня; сборка с помощью гидропостамента секторов пресс-формы; набор для раздаточной печи дозы алюминиевого сплава и заливка ее в пресс-камеру машины литья под давлением; запрессовка металла в полость пресс-формы; кристаллизация отливки; раскрытие и разборка пресс-формы; извлечение отливки из полости пресс-формы, охлаждение и перенос отливки в пресс; обрубка отливки и передача ее на цеховой транспортер или в спецтару; контроль основных параметров технологического процесса литья.

Сложнейшим элементом АТК для отливки станин является четырехсекторная пресс-форма (рис. 10.3), формообразующая полость которой образуется при сборке в кольцо четырех вкладышей (рис. 10.4). Вкла-

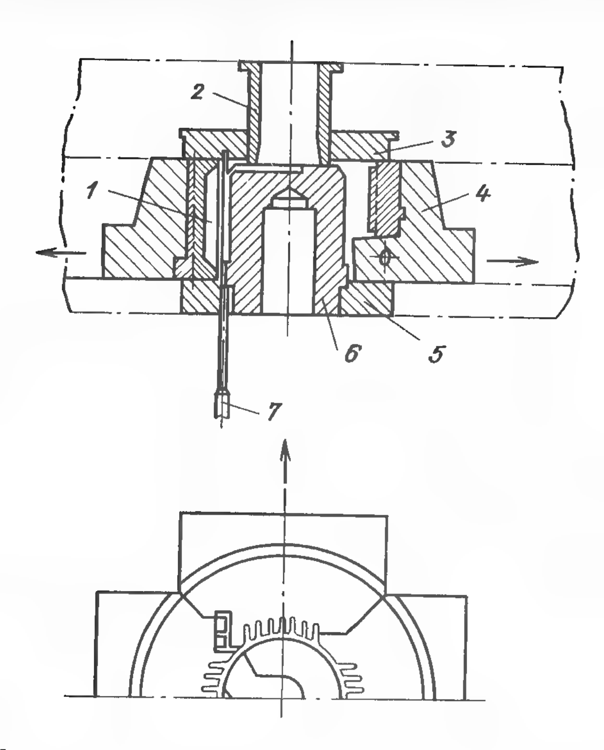


Рис. 10.3. Четырехсекторная пресс-форма для отливки из высокопрочного алюминиевого сплава станин с вертикально-горизонтальным оребрением:

1 – вкладыш; *2* – литниковая втулка; *3, 5* – фланцы; *4* – плита; *6* – стержень; *7* – выталкиватель

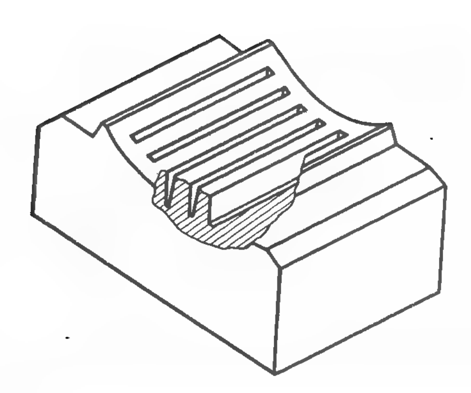


Рис. 10.4. Вкладыш четырехсекторной пресс-формы

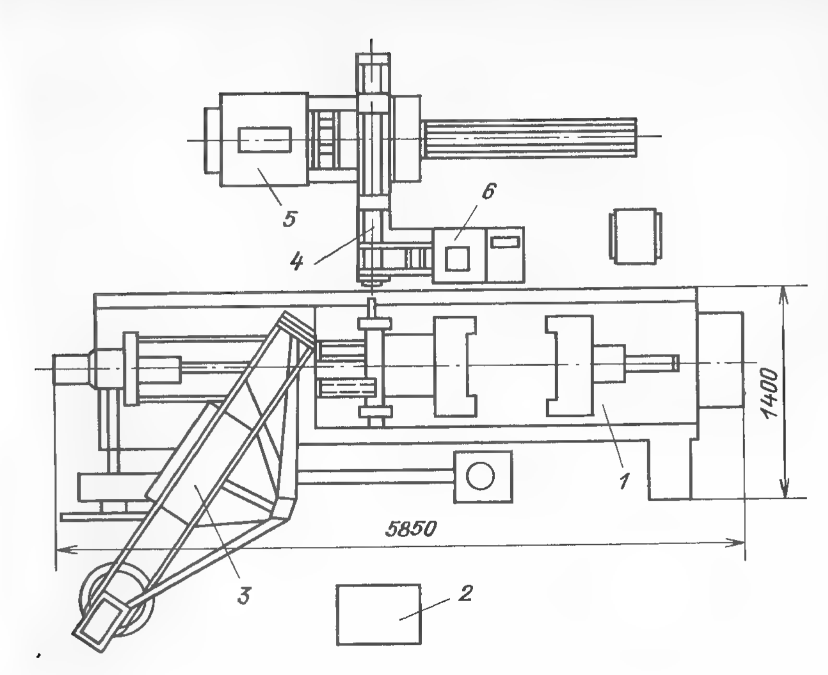


Рис. 10.5. Схема автоматизированного технологического комплекса для заливки под давлением роторов двигателей габаритов 63–132 мм:

1 – машина литья под давлением 711А08; *2* – шкаф управления; *3* – манипулятор-заливщик дозы жидкого алюминия; *4* – конвейер передачи каретки с сердечниками и залитыми роторами; *5* – пресс для отделения литника и выпрессовки из каретки залитых роторов; *6* – установка загрузки сваренных сердечников в каретку

дыши перемещаются во взаимно перпендикулярных направлениях с помощью гидроприводов. Изготовление вкладышей требует широкого внедрения в инструментальных цехах электроэрозионных методов обработки металлов.

На рис. 10.5 приведена схема АТК модели РЛ-180 для заливки роторов АД с высотами оси вращения 63–132 мм. На АТК в автоматическом режиме могут выполняться следующие операции: установка сердечников роторов на позицию загрузки и в каретку; транспортировка каретки с сердечниками на позицию заливки; сборка пресс-формы; набор дозы металла, заливка дозы в пресс-стакан, запрессовка металла; разборка пресс-формы; транспортировка каретки с залитыми роторами к прессу; отделение литника и выпрессовка роторов из каретки; транспортировка каретки на позицию загрузки сердечников.

10.4. ПРОИЗВОДСТВО ЗАГОТОВОК ВАЛОВ

Для экономии проката черных металлов в серии АИ предусматривается изготовление ступенчатых заготовок валов методами пластической обработки: АД с высотами оси вращения 56–132 мм – поперечно-клиновой прокаткой, с высотами оси вращения 160–250 мм – радиальной ковкой (табл. 10.5). Заготовка валов на плашечном стане UWQ 40×400 выполняется в следующей последовательности. Прутки из накопителя по рольгангу поступают в разделительный штамп кривошипного пресса. Полученные после резки мерные заготовки из тары выгружаются в бункерное устройство и затем подаются в индуктор. Нагретые до температуры 1100–1150°С заготовки попадают в клеть стана, где плашками формуется заготовка вала. Сформованная заготовка вала по транспортеру поступает в тару, а затем после остывания направляется для очистки от окалины в виброустановку, находящуюся в отдельном блоке.

Заготовка валов производится на валковом стане 700. Заготовка из накопителя поступает через проводки в индуктор и затем в рабочую клеть. Привод, вращая валки, формует заготовку за один оборот валков, одновременно отрезая от прутка поковку вала.

На стане 100 изготовляются поковки валов диаметром 30–42 мм, на стане 1000 – диаметром 42–56 мм. Каждая пара валков предназначена только для одного конкретного размера вала.

Таблица 10.5

Тип или модель оборудования	Страна-разработчик	Высота оси вращения АД, мм	Масса заготовки, кг	Производительность оборудования, шт/ч	Габариты оборудования, (длина × ширина × высота), мм	Экономия металла на одну заготовку, кг	Примечание
Стан UWQ 40×400	ГДР	50	0,23			0,06	Плашечный стан
		56	0,36	180	11 000×8600× ×4,500	0,04	
		63	0,54			0,08	
		80	2,34			0,32	
Стан 700	СССР	80	2,34			0,32	Валковый стан
		90	2,2	200	17 500×3200× ×1600	0,31	
		100	2,97			0,37	
Стан 1000	СССР	112	4,9	180	19 000×3350× ×1700	1,03	То же
		132	8,77			1,27	

Радиальная ковка валов двигателей с высотами оси вращения 160–250 мм выполняется в следующей последовательности. Прутки диаметром до 95 мм поступают на разделку к пресс-ножницам, а свыше 95 мм – на дисковую пилу. Мерные заготовки подаются в накопитель, а из него с помощью толкателя – в нагреватель. Затем нагретые до температуры ковки заготовки перемещаются толкателем в перекладчик, который переносит заготовку в манипулятор. Манипулятор, совершая одновременно поступательное и вращательное движения, подает заготовку в рабочую клеть, где проковывается один конец заготовки вала. После этого заготовка продвигается, захватывается манипулятором и проковывается другой конец поковки вала. Затем заготовка захватывается перекладчиком и укладывается в тару. Инструмент переналаживается по программе. Экономия металла при такой ковке валов составляет от 1,5 до 9,7 кг на заготовку.

Ступенчатые заготовки валов, полученные рассмотренными методами, имеют минимальные припуски для механической обработки.

10.5. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Механообрабатывающее оборудование для серии АИ по сравнению с серией 4А не претерпело принципиальных изменений. Однако при заказе его были учтены повышенные требования к точности и чистоте механической обработки деталей и узлов серии АИ, а также требования АСУ ОТ, касающиеся информационной связи АТК с вышестоящими ступенями управления и роботизированными выходами на АТСК. В табл. 10.6 приводится типовой набор основного механообрабатывающего оборудования для АД габаритов 56, 90, 112, 160, 225 мм. Ниже в качестве примера рассматриваются технические особенности основного оборудования для обработки деталей АИ132.

Станины (чугунные). Станины чугунные обрабатываются на автоматической линии бесспутникового типа (рис. 10.6). Производительность линии 52,5 шт/ч. Детали передаются шаговым транспортером с грейферными захватами. При обработке применяется эмульсия для смыва стружки, быстрого перераспределения температурно-релаксационных напряжений и уменьшения деформации обрабатываемых станин. Для повышения производительности на каждой рабочей позиции обрабатываются одновременно две детали. Предусмотрен автоматический контроль поломки концевого инструмента на рабочих позициях и размера расточки под сердечник пневматическими приборами типа "Аэропан". Линия оснащена локальной системой управления технологическим процессом, который протекает по следующей схеме (рис. 10.6): *I* – накопление заготовок; *II* – подрезка торцов, обтачивание замков, снятие фасок одновременно с двух сторон; *III* – расточка первой половины внутренней поверхности сердечника статора и выточки с одной стороны; *IV* – рас-

13–6983

Таблица 10.6

Деталь, узел, операция	Типовой набор механообрабатывающего оборудования и его производительность P, тыс. шт/год, для АД с высотами оси вращения, мм				
	56	90	112	160	225
Станина, полная механическая обработка	Агрегатный станок (ГДР), $P = 500$	Комплект агрегатных станков (ГДР), $P = 325$	Автоматическая линия (ГДР), $P = 225$	Автоматическая линия (ГДР), $P = 120$	Автоматическая линия (СССР), $P = 60$
Щит подшипниковый, полная механическая обработка	То же	Комплект агрегатных станков (ГДР), $P = 600$	Комплект агрегатных станков (ГДР), $P = 450$	Автоматическая линия (ГДР), $P = 160$	Автоматическая линия (ГДР), $P = 75$
Вал-ротор, полная обработка и сборка вала с сердечником	Автоматическая линия (ГДР), $P = 500$	Автоматическая линия (ГДР), $P = 160$	Автоматическая линия (ГДР), $P = 140$	Автоматическая линия (ГДР), $P = 75$	Автоматическая линия (СССР), $P = 60$
Статор (комплект), обработка отверстия сердечника	Автомат хонинговальный (СССР), $P = 250$	Автомат хонинговальный (СССР), $P = 110$	Автомат хонинговальный (СССР), $P = 110$	Автомат расточный (СССР), $P = 70$	Полуавтомат расточный (СССР), $P = 30$
Сердечник статорный, обработка по верху	Автомат (ГДР), $P = 500$	Автомат (ГДР), $P = 300$	Автомат (НРБ), $P = 225$	Автомат (НРБ), $P = 140$	Автомат (НРБ), $P = 60$
Тепловая сборка ротора с валом	Автомат (ГДР), $P = 500$	Автомат (СССР), $P = 180$	Автомат (СССР), $P = 150$	Автомат (СССР), $P = 140$	Автомат (СССР), $P = 60$
Балансировка вала-ротора	Автомат (СССР), $P = 500$	Автомат (СССР), $P = 300$	Автомат (СССР), $P = 225$	Автомат (СССР), $P = 160$	Автомат (СССР), $P = 100$
Статор (комплект), обработка замков	Автомат (СССР), $P = 250$	Автомат (ВНР), $P = 150$	Автомат (ВНР), $P = 112{,}5$	Автомат (ВНР), $P = 85$	Автомат (ВНР), $P = 46{,}5$
Двигатель в сборе, обработка фланца щита	То же, $P = 125$	То же, $P = 110$	То же, $P = 90$	То же, $P = 70$	Полуавтомат (СССР), $P = 30$

точка второй половины внутренней поверхности сердечника статора и выточки с другой стороны; *V* – фрезеровка упорной поверхности лап; *VI* – сверление отверстия под табличку, сверление и цекование отверстия под винты заземления; *VII* – сверление отверстий под резьбу для крепления щитов, под выводы; *VIII* – нарезание резьбы в отверстии для крепления щитов, сверление отверстий для крепления крышки

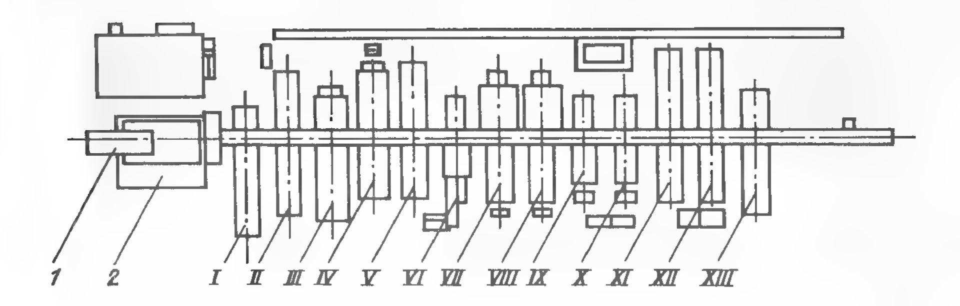


Рис. 10.6. Схема автоматической линии для обработки чугунных станин АД с высотой оси вращения 132 мм:

1 – транспортер для отвода стружки; *2* – резервуар для смазочно-охлаждающей жидкости

вводного устройства; сверление и цекование отверстия под рым-болт; *IX* – нарезание резьбы в отверстиях для крепления крышки вводного устройства и в отверстиях под болты заземления; *X* – предварительное растачивание отверстия под сердечник; *XI* – окончательное растачивание отверстия под сердечник; *XII* – подрезка торцов, обтачивание замков, снятие фасок (одновременно с двух сторон); *XIII* – накопитель готовых деталей.

С учетом того, что в серии АИ принято плотное прилегание ушек щита к станине, на позициях подрезки торцов (*II* и *XII*) установлены станки с увеличенным ходом подрезных суппортов.

Щиты. Щиты обрабатывают на агрегатных сверлильно-расточных станках. Комплект агрегатных станков (5 шт.) оснащен локальной управляющей системой (на базе микро-ЭВМ). Производительность станка – 21 шт/ч, для фланцевых щитов – 19 шт/ч при коэффициенте использования 0,8. Каждый станок снабжен поворотным столом и загрузочно-разгрузочным устройством, расположенным над станком. Загрузка станков – кассетная. Подача очередного щита на установочно-зажимное приспособление осуществляется автооператором.

После окончательной расточки замка и отверстия под подшипник размеры контролируются пневматическим сильфонным прибором типа "Аэропан". Щит закрепляют аксиальным усилием, приложенным в трех точках против установочных баз, что способствует снижению деформаций. Кроме того, перед чистовыми проходами производят перезажим детали меньшим усилием. Эти мероприятия позволяют обрабатывать щиты АД серии АИС с высотой оси вращения 132 мм с соблюдением повышенных требований по точности обработки.

В щитах, как и в станинах, у АД серии АИ имеется на ушках увеличенная по сравнению с серией 4А контактная площадка, для обработки



Рис. 10.7. Схема комплекта агрегатных станков для обработки чугунных щитов АД с высотой оси вращения 132 мм

которой на позиции подрезки торца предусмотрен увеличенный ход подрезного суппорта. Расположение позиций агрегатного станка приведено на рис. 10.7. Станок — семипозиционный с автоматическим загрузочно-разгрузочным устройством. Технологический процесс протекает следующим образом: *I* — автоматическая установка заготовки и снятие готовой детали; *II* — предварительная обработка отверстий под вал и подшипник, подрезание торца ступицы, сверление отверстия и в ушках для крепления щитов; *III* — получистовая обработка отверстия под подшипник, предварительная обработка замковой поверхности с подрезкой торца, растачивание фасок; *IV* — перезажим детали (у задних щитов — сверление и нарезание резьбы в ушках для крепления кожуха); *V* — растачивание канавки в отверстии под подшипник, подрезка; *VI* — окончательная обработка замковой поверхности, отверстия под подшипник и отверстия для выхода вала; *VII* — автоматический контроль замка и отверстия под подшипник.

Валы-роторы. Основное отличие линии обработки валов — возможность оперативной переналадки на разные исполнения валов-роторов (от 7 до 14 типоразмеров). Предусмотрены активный контроль и переналадка в процессе работы на финишных операциях, что позволяет обеспечить точность шлифовки подшипниковых шеек по 5-у квалитету (1-й класс точности). Кроме того, в линию встраивается автомат для балансировки роторов и АТК тепловой сборки вала с ротором. На рис. 10.8 приведена схема линии сборки валов производительностью 31 шт/ч при коэффициенте использования 0,7, на рис. 10.9 и 10.10 — схемы участков тепловой сборки вала с ротором и балансировки вала-ротора.

Технология тепловой сборки ротора с валом. Сердечники и валы поступают в соответствующие накопители, из которых сердечники поштучно выдаются на конвейер нагревательного устройства, а валы — на призму вала автомата сборки. На позиции сборки производятся ориентация, сборка и предварительное охлаждение роторов. Собранные роторы из автомата сборки передаются на барабан механизма охлаждения, а затем — на конвейер — накопитель роторов.

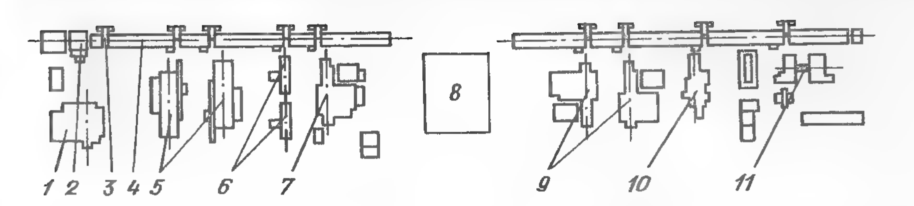


Рис. 10.8. Схема автоматической линии для обработки валов-роторов АД с высотой оси вращения 132 мм:

1 — фрезерно-центровальный автомат (фрезерование торцов и сверление центровых отверстий); *2* — накопитель заготовок и механизм автоматической подачи их на линию; *3* — портально-грейферное устройство; *4* — цепной транспортер; *5* — токарно-гидрокопировальный автомат (токарная обработка вала); *6* — шпоночно-фрезерный автомат (фрезерование шпоночного паза); *7* — круглошлифовальный автомат (шлифование поверхности под сердечник ротора); *8* — участок тепловой сборки вала с ротором; *9* — круглошлифовальные автоматы (шлифование шеек и опорных торцов под подшипник); *10* — специальный токарный станок (обточка сердечника ротора); *11* — балансировка

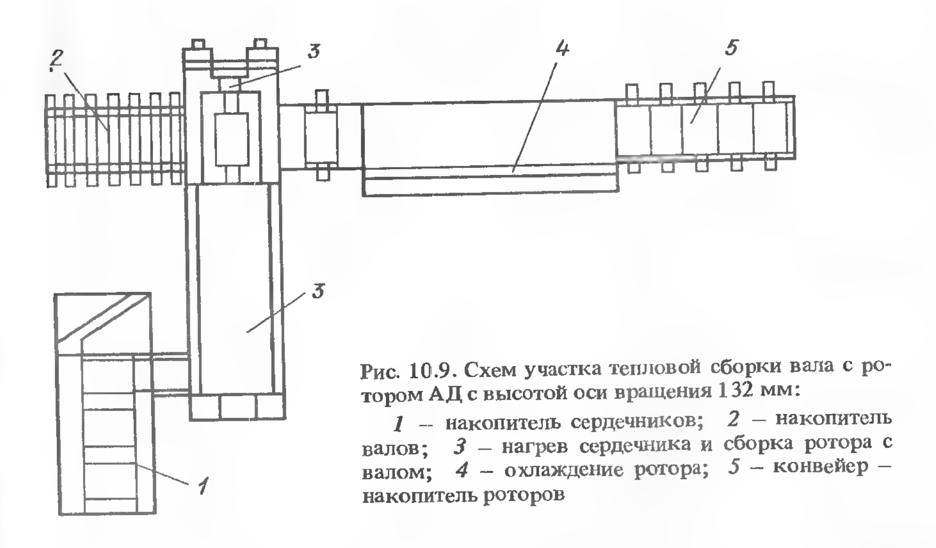


Рис. 10.9. Схем участка тепловой сборки вала с ротором АД с высотой оси вращения 132 мм:

1 — накопитель сердечников; *2* — накопитель валов; *3* — нагрев сердечника и сборка ротора с валом; *4* — охлаждение ротора; *5* — конвейер — накопитель роторов

Технология балансировки роторов. Ротор с автоматической линии механообработки валов-роторов или с накопителя портальным манипулятором подается сначала на балансировочный станок, где определяются место и значение дисбаланса, а затем — на корректирующий станок. Дисбаланс устраняется установкой грузов. Ротор подается манипулятором на балансировочный станок для контроля остаточного дисбаланса, затем в накопитель отбалансированных роторов.

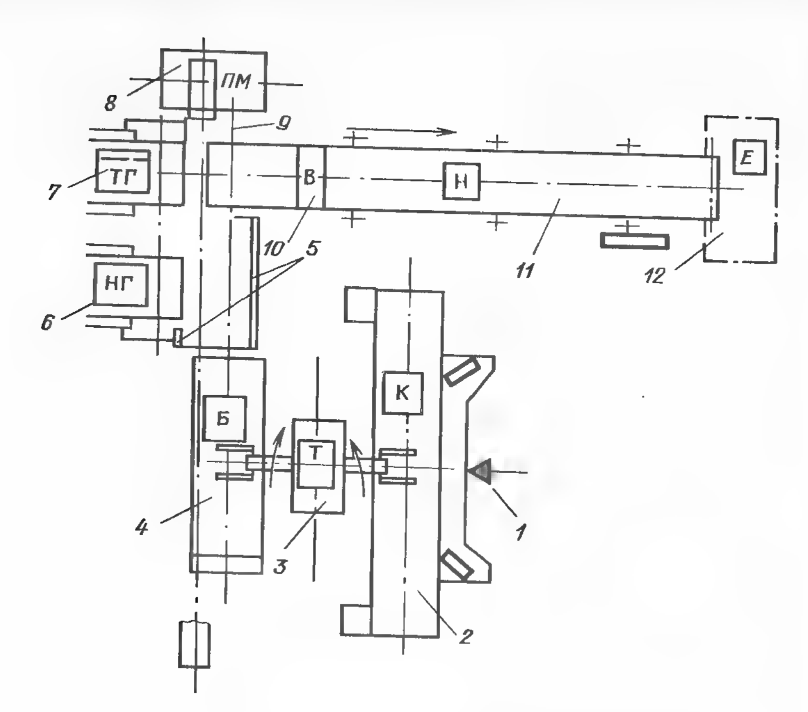


Рис. 10.10. Схема участка балансировки вала-ротора АД с высотой оси вращения 132 мм:

1 – место оператора; *2* – корректирующий станок; *3* – манипулятор; *4* – балансировочный станок; *5* – ограждение; *6* – накопитель; *7* – транспорт; *8* – портальный манипулятор; *9* – ось позиции разгрузки; *10* – загрузочное устройство; *11* – накопитель отбалансированных роторов; *12* – съемник роторов

Хонингование внутренней поверхности статора. Хонингование осуществляется на специальном одношпиндельном хонинговальном автомате с трехпозиционным поворотным столом и автоматическим загрузочно-разгрузочным устройством (на базе станка 3К83). Статор устанавливается в гидравлическое зажимное приспособление, снабженное защитным устройством от повреждения лобовых частей обмотки хонинговальной головкой. Обработка производится без применения смазочно-охлаждающей жидкости. В процессе хонингования предусмотрен отсос абразивной пыли. Автомат снабжен прибором активного контроля диаметра статора. Производительность автомата — 72 шт/ч при коэффициенте использования 0,8.

10.6. ТЕХНОЛОГИЯ ШТАМПОВКИ

Листы магнитопровода штампуют на прессах-автоматах (табл. 10.7). В целях экономии проката черных металлов для АД с высотой

Таблица 10.7

Высота оси вращения АД, мм	Модель пресса-автомата	Производительность, тыс.компл./год	Габаритные размеры оборудования, мм
50	PASZ-160/2 (ГДР)	800	9000×5200×3600
56	PASZ-160/2 (ГДР)	750	9000×5200×3600
63	PASZ-160/2 (ГДР)	650	9000×5200×3600
71	А2-200 (ЧССР)	500	9200×4800×4530
80	А2-200 (ЧССР)	300	9200×4800×4530
90	PASZ-250/2 (ГДР)	250	11000×8600×4500
100	PASZ-250/2 (ГДР)	200	11000×8600×4500
112	А2-200 (ЧССР)	100	9200×4800×4530
132	А2-200 (ЧССР)	80	9200×4800×4530
160	АА6032 (СССР)	20	13000×4145×6430
180	АА6032 (СССР)	20	13000×4145×6430
200	РДА-40 (Япония)	40	12180×6450×5370
225	РДА-30 (Япония)	20	16400×4300×4900
250	РДА-30 (Япония)	20	16400×4300×4900

Примечание. Для двигателей с высотами оси вращения до 100 мм применяется двухрядная штамповка, а с высотами оси вращения выше 200 мм — однорядная.

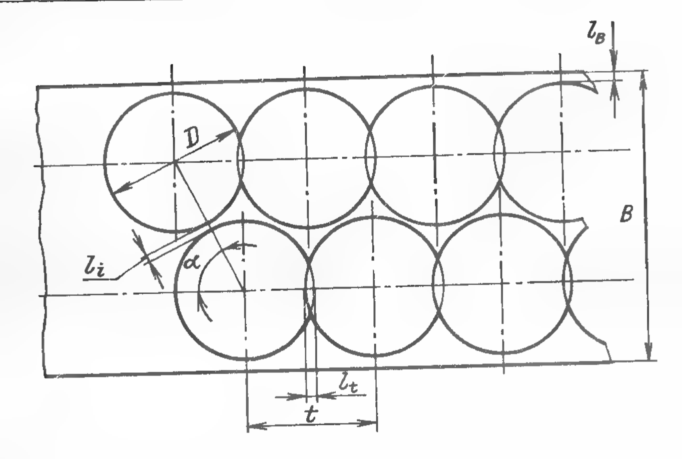


Рис. 10.11. Двухрядный шахматный раскрой ленты с отрицательной перемычкой по шагу подачи материала

оси вращения до 10 мм включительно применяют двухрядный шахматный раскрой ленты (рис. 10.11), дающий экономию электротехнической стали 8–9%. Для двигателей с высотой оси вращения 112 мм и выше раскраивают ленту на фигурные полосы (рис. 10.12), что эконо-

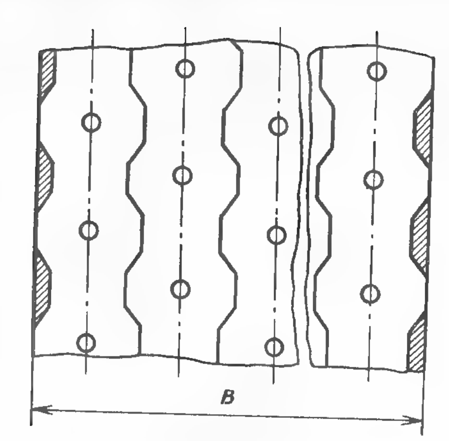


Рис. 10.12. Раскрой ленты на фигурные полосы

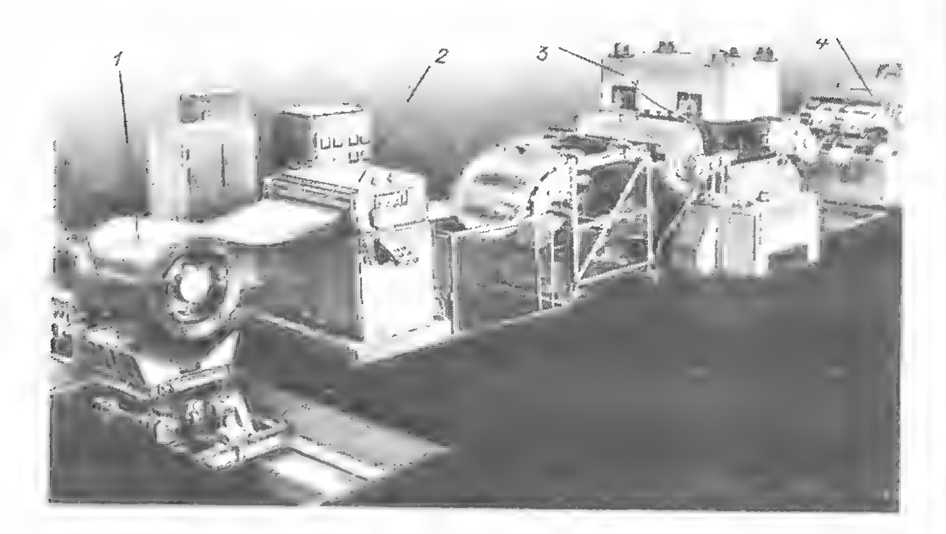
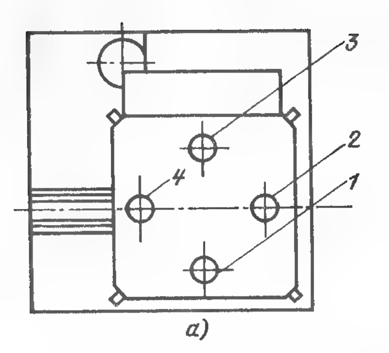


Рис. 10.13. Линия для фигурного раскроя ленты:

1 – механизм разматывающего устройства; *2* – правильный механизм; *3* – раскройный пресс; *4* – механизм наматывающего устройства; *5* – разгрузочная тележка

мит 10–12% электротехнической стали. На рис. 10.13 показана линия для фигурного раскроя ленты. Сборку магнитопроводов статора и ротора производят на АТК (рис. 10.14, табл. 10.8).

Листы статора (ротора) ориентируются и загружаются на сборочную оправку, где контролируется длина сердечника, а затем на позиции оп-



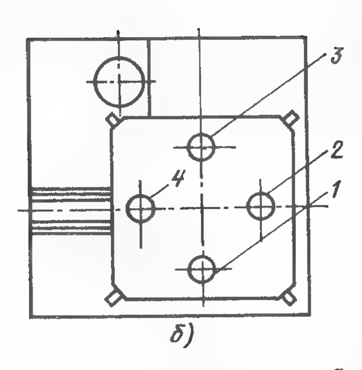
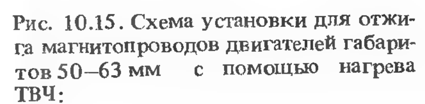


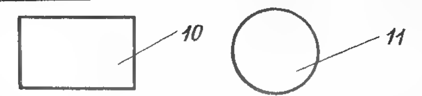
Рис. 10.14. Схема автоматизированного технологического комплекса для сборки магнитопровода статора (ротора):

а – сборка статора; *б* – сборка ротора; *1* – загрузка и контроль длины сердечников статора (ротора); *2* – опрессовка сердечников; *3* – сварка сердечников; *4* – вынос сердечников на приемный лоток

Таблица 10.8

Высота оси вращения АД, мм	АТК	Производительность АТК, тыс. шт/год	Габаритные размеры оборудования, мм
50–63	Сборка магнитопровода статора	600	4500×3000
71–100		450	5000×3000
112–132		225	6000×3000
160–200		150–180	6000×4000
225–250		60	6000×4500
50–63	Сборка магнитопровода ротора	600	4000×2500
71–100		450	4000×3000
112–132		225	4500×3000
160–200		150–180	6000×3000
225–250		60	6000×3000





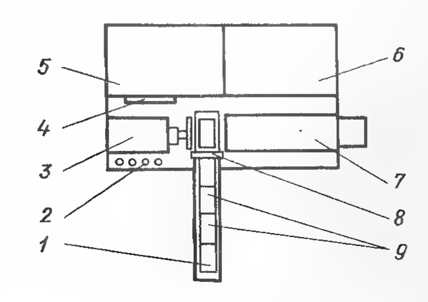


Рис. 10.15. Схема установки для отжига магнитопроводов двигателей габаритов 50–63 мм с помощью нагрева ТВЧ:

1 – накопитель; *2* – пульт управления; *3* – пневмотолкатель; *4* – приборная панель; *5* – шкаф управления нагревателем; *6* – конденсаторные батареи; *7* – индуктор; *8* – отсекатель; *9* – отжигаемые магнитопроводы; *10* – шкаф управления генератором УПЗ-50/2,4; *11* – генератор ВПЧ-50/2,4

рессовки и сварки сердечников. Сваренный сердечник поступает на приемный лоток.

После сборки сердечники при необходимости подвергают термообработке, проводимой на специальных установках (рис. 10.15).

10.7. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

В СССР производство обмотанных статоров и сборка АД осуществляются на АТК (табл. 10.9, рис. 10.16).

Технические данные АТК по рис. 10.16

Количество одновременно устанавливаемых, шт:
- статоров, отличающихся профилем (или длиной сердечника) 2
- статоров, отличающихся обмоточными данными 2

Численность, чел.:
- основных рабочих в смену 25
- наладчиков (механиков и электриков) 4

Максимальная длительность одной переналадки части оборудования линии, настроенного на одно типоисполнение статора, ч:
- при переходе с одной полюсности на другую 16
- при переходе с одной длины на другую (при той же полюсности) 10
- при переходе с одних обмоточных данных на другие (при тех же габаритах сердечников) 1,2

Технологические операции (рис. 10.16) включают:

проточку сердечника по наружной поверхности;

контроль геометрических размеров сердечника;

изолирование пазов сердечника статора;

Таблица 10.9

Высота оси вращения АД, мм	АТК	Производительность АТК, тыс. шт/год	Габаритные размеры оборудования, мм
50–63	Сборка и обработка статоров, общая сборка и приемосдаточные испытания АД	500	70 000×5000
71–100		400–300	65 000×5000
112–132		225–200	75 000×10 000
160–200		160–120	70 000×10 000
225–250		100	75 000×10 000
50–63	Обмотка и пропитки статоров	400	60 000×5000
71–132		300–200	95 000×9200
160–200		100	35 000×1400
225–250		50	36 500×16 500

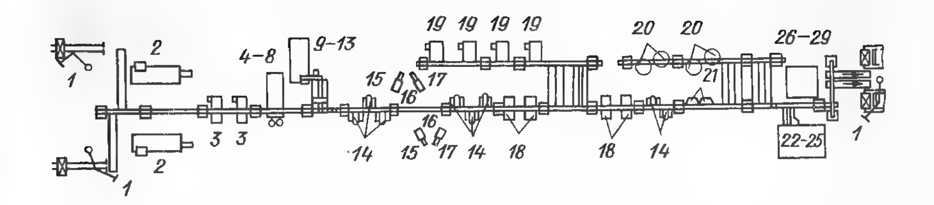


Рис. 10.16. Схема автоматизированного технологического комплекса для производства обмотанных сердечников статоров двигателей габарита 132 мм:

1 – пневматический манипулятор; *2* – специальный токарный автомат; *3* – пазоизолировочный автомат; *4–8* – намоточные станки; *9–13* – станки для втягивания обмотки в пазы; *14* – двухпозиционное поворотное рабочее место для изолирования концов катушечных групп, увязки выводных концов; *15* – станок для соединения обмоточных проводов; *16* – пятипозиционный поворотный стол (соединение катушечных групп); *17* – станок для подсоединения выводных проводов; *18* – автомат формования лобовых частей; *19* – бандажировочный станок; *20* – трехпозиционное поворотное рабочее место (исправление дефектных обмоток); *21* – стенд для контроля статоров; *22–25* – установки для пропитки и термообработки обмоток; *26–29* – трансформаторы

намотку, втягивание, заклинивание обмотки в пазах и постадийный разжим лобовых частей;

установку междуфазной изоляции;

изолирование концов катушечных групп и подготовку обмотки к сборке схемы;

соединение катушечных групп, подсоединение выводов, изолирование мест соединений;

увязку выводов;

формование и калибровку лобовых частей обмотки;

бандажирование лобовых частей;

визуальный контроль качества и устранение мелких дефектов;

контрольные электрические испытания сердечника статора обмотанного;

ремонт дефектных статоров;

пропитку, термообработку и охлаждение статоров;

комплектацию статоров по исполнениям с установкой их на стеллаж-накопитель.

На рис. 10.17 приведена схема АТК для сборки АД с высотой оси вращения 132 мм.

Технические данные АТК по рис. 10.17

Количество одновременно собираемых АД, шт 1

Численность в смену, чел:
- основных рабочих 14
- наладчиков 4

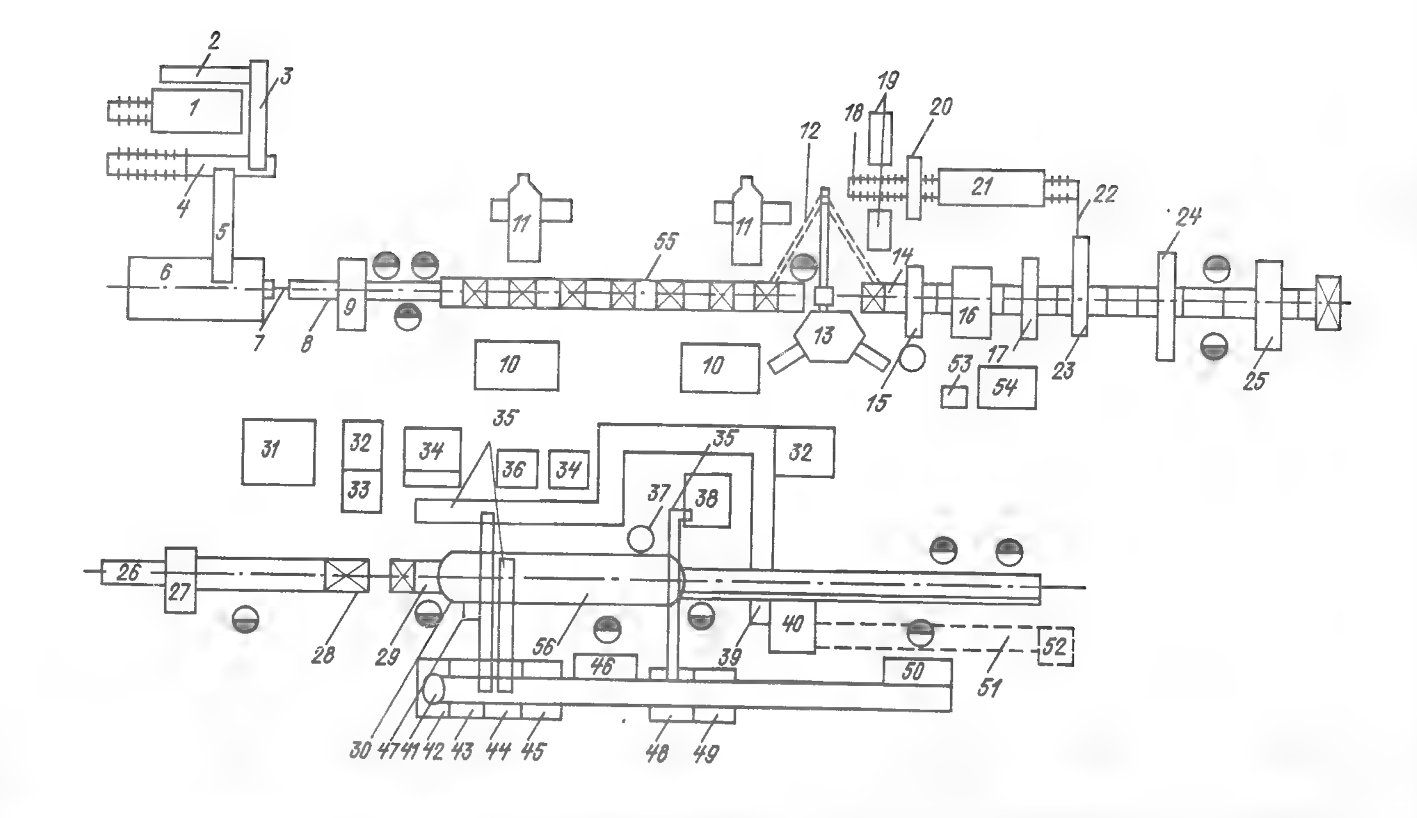


Рис. 10.17. Схема автоматизированного технологического комплекса для сборки и контрольных испытаний двигателей габарита 132 мм:

1 – установка для нагревания станин; *2* – накопитель станин; *3* – манипулятор для установки станин; *4* – автомат сборки сердечника со станиной; *5* – манипулятор перегрузки статора; *6* – установка для охлаждения статора; *7* – манипулятор перегрузки статора; *8* – конвейер участка механической обработки статора; *9* – автомат сверления отверстия под штифт; *10* – автомат механической обработки отверстия статора; *11* – автомат механической обработки замков статора; 12 – консольно-поворотный кран; *13* – автомат механической обработки отверстий и лап статора; *14* – конвейер участка общей сборки; *15* – автомат продувки статора; *16* – установка для консервации; *17* – автомат для смазки замковых поверхностей статора; *18* – конвейер участка сборки ротора; *19* – установка нагрева подшипников; *20* – автомат сборки ротора с подшипниками; *21* – установка охлаждения; *22* – манипулятор подачи ротора в автомат; *23* – автомат установки ротора в статор; *24* – автомат установки и напрессовки подшипниковых щитов; *25* – автомат завинчивания болтов крепления щитов; *26* – конвейер участка установки вентилятора и кожуха; *27* – автоматическое устройство крепления вентилятора; *28* – манипулятор перегрузки электродвигателя; *29* – транспортер; *30* – система коммутирующая; *31* – автотрансформатор; *32, 33* – трансформаторы; *34* – автотрансформатор; *35* – короб электроразводки; *36* – автотрансформатор; *37* – устройства ввода сжатого воздуха; *38* – шкаф; *39* – пульт вспомогательный; *40* – перегрузчик дефектных двигателей; *41* – устройство ввода электропитания; *42–45* – шкафы; *46* – пульт управления; *47* – пульт управления вспомогательный; *48, 49* – шкафы; *50* – пульт управления; *51* – накопитель дефектных АД; *52* – пульт вспомогательный; *53* – шкаф управления (системы управления АТК и энергоснабжения); *54* – система оперативной информации и централизованного контроля; *55* – сборка; *56* – испытания

Технологические операции (по рис. 10.17) включают:

нагрев станин;

сборку сердечника со станиной;

охлаждение статора;

сверление отверстий под штифт;

установку штифта;

установку вводного устройства, рым-болта, табличек;

обработку отверстия статора;

проточку замков статора;

сверление отверстий в лапах и фрезерование опорной поверхности лап;

продувку статора сжатым воздухом;

консервацию отверстия статора пастой;

смазку замковых поверхностей статора;

нагрев и установку подшипников на вал ротора;

охлаждение ротора;

установку ротора в статор;

установку и напрессовку подшипниковых щитов на замки статора;

установку и завинчивание болтов крепления щитов;

установку вентилятора и кожуха;

крепление вентилятора и кожуха;

контрольные электрические испытания АД;

заключительную сборку АД.

В отличие от серии 4А в серии АИ для защиты от коррозии деталей АД различных климатических исполнений используются водоразбавляемые материалы и только для 10–15% машин–лакокрасочные материалы на органических растворителях. Водоразбавляемые материалы имеют повышенные защитные свойства и универсальны для всех применяемых подложек (стали, чугуна, алюминия) и для большинства климатических исполнений. Внедрение их позволило перейти на малоотходную технологию и увеличить коэффициент использования материала с 0,23 до 0,9.

В табл. 10.10 приведен перечень оборудования для окраски деталей и узлов АД, принятый в СССР. Оборудование представляет собой технологические цепочки, объединенные конвейером. Поверхность деталей (из чугуна, стали, алюминия) подготавливается к окраске в специальных агрегатах. Все операции выполняются автоматически. Масла из обезжиривающих растворов регенерируются и возвращаются в производство. Грунт или эмаль наносится автоматически окунанием, обливом или пневмораспылением. Сушка слоя грунта осуществляется в одно-, двух- или многоходовых терморадиационных или конвекционных сушилах.

Поверхность собранных АД подготавливается к окраске в специальных камерах. Окраска производится с помощью устройства автомати-

Таблица 10.10

Высота вращения, мм	Оборудование	Производительность, т/год	Габаритные размеры оборудования, мм
71–250	Линия окраски деталей	1204,5	47 000×14000
80–250	То же	48 180	60 000×7000
71–250	Линия грунтовки чугунных и алюминиевых отливок	20 000	56 000×65 000
50–132	То же	6666	56 000×65 000
50–71	Полуавтоматическая установка для окраски роторов	–	1500×1400
80–100	То же	–	1695×1480
112–132	Автоматическая линия для окраски роторов	–	19 720×4220

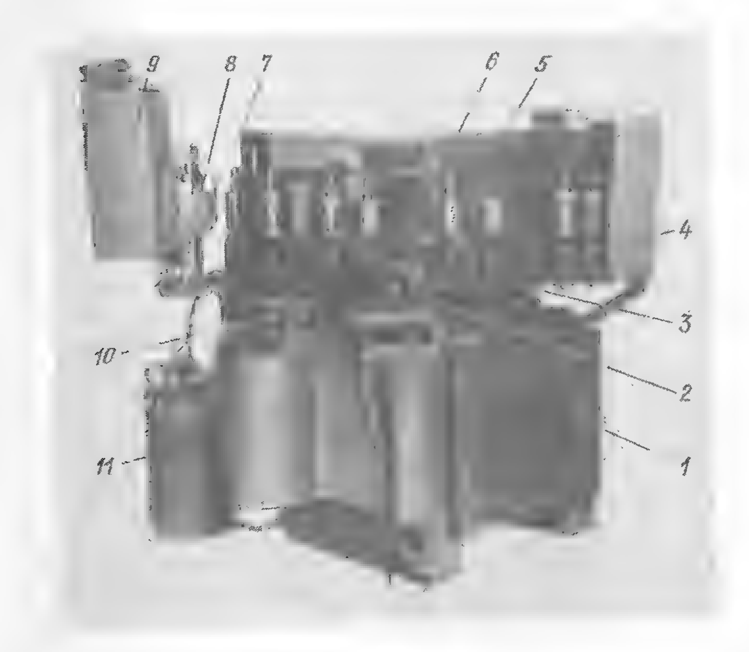


Рис. 10.18. Общий вид установки для окраски роторов:

1 – станина; *2* – механизм поворота стола; *3* – поворотный стол; *4* – приспособление для установки роторов; *5* – кожух; *6* – узел обезжиривания; *7* – краскораспылитель; *8* – отражатель; *9* – краскосборник; *10* – механизм вращения роторов; *11* – нагнетательный бак

ческой окраски, сушка – в одно- , двух- или многоходовых конвекционных сушильных установках. Для охраны окружающей среды, сушильные камеры оборудуются установками каталитического дожигания органического растворителя отходящих газов, а окрасочные камеры – устройствами для сбора и переработки отходов лакокрасочных материалов.

На рис. 10.18 приведен общий вид установки для окраски роторов.

10.8. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ТРАНСПОРТНО-СКЛАДСКОЙ КОМПЛЕКС И ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Типичная планировка производственного корпуса по выпуску АД серии АИ приведена на рис. 10.19. Автоматизированный транспортно-складской комплекс (АТСК) предусматривает механизацию транспортных средств за счет применения подвесных толкающих конвейеров с автоматическим адресованием грузов и автоматизированных складов с автоматическим учетом и управлением.

Со складов заготовки щитов, валов, станин и сердечников роторов в таре подаются электропогрузчиками или тягачом с прицепными тележками на участки механообработки. После механообработки готовые детали и узлы с накопителей автоматических линий отправляются на автоматизированные склады. По командам организационно-технологической автоматической системы управления (АСУ ОТ) краны-штабелеры производят погрузоразгрузочные операции на подвесном толкающем конвейере. Все погрузоразгрузочные работы в корпусе выполняются с помощью автоматических устройств и средств механизации. Взаимодействие транспорта и складов осуществляется на базе системы управления.

Организационно-технологическая автоматизированная система управления объединяет АСУ технологическими процессами (АСУ ТП) с АСУ предприятием (АСУ П). В табл. 10.11 приведен перечень технических средств АСУ ОТ.

Система АСУ П решает организационные (экономические) задачи. Она представляет собой сложную человеко-машинную систему социально-экономических и организационных факторов, людей, технических средств, информации, процессов и методов управления. АСУ П состоит из следующих подсистем:

перспективное и текущее технико-экономическое и социальное планирование (6 задач);

управление технической подготовкой производства (6 задач);

оперативное управление производством (14 задач);

управление качеством продукции (4 задачи);

материально-техническое снабжение (12 задач);

сбыт продукции (9 задач);

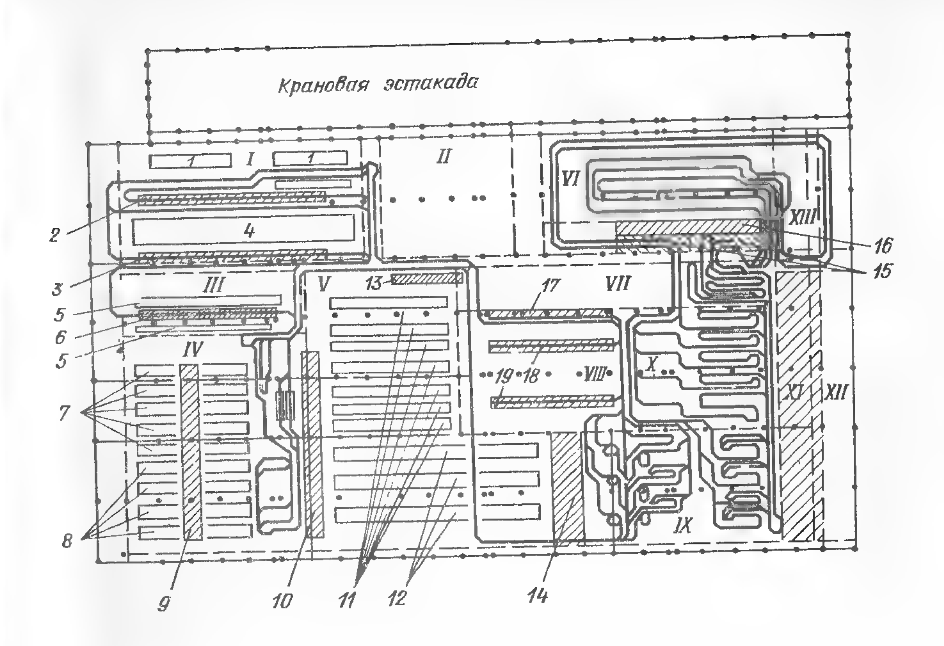


Рис. 10.19. Типичная планировка корпуса электромашиностроительного предприятия по выпуску АД серии АИ с применением АТК, АТСК и АСУ ОТ:

I – участок обработки станин и щитов АД с высотами оси вращения 112 – 113 мм; *II* – участок штамповки; *III* – участок обработки щитов и станин АД с высотами оси вращения 56–71 мм; *IV* – участок обработки вала-ротора АД с высотами оси вращения 56–71, 112–132 мм; *V* – участок обмотки АД с высотами оси вращения 56–71, 112–132 мм; *VI* – окрасочное отделение; *VII* – ремонтно-механический цех; *VIII* – заготовительный участок; мастерская ремонта оснастки; *IX* – участок сборки АД с высотами оси вращения 112–132 мм; *X* – участок сборки АД с высотами оси вращения 56–71 мм; *XI* – автоматизированный склад готовой продукции; *XII* – участок установки АД на поддоны; *XIII* – участок упаковки и отправки; *1* – АТК обработки станин АД с высотами оси вращения 112–132 мм; *2* – автоматизированный склад станин АД с высотами оси вращения 112–132 мм; *3* – автоматизированный склад щитов АД с высотами оси вращения 112–132 мм; *4* – агрегатные станки для обработки щитов АД с высотами оси вращения 112–132 мм; *5* – то же для АД с высотами оси вращения 56 – 74 мм; *6* – автоматизированный склад алюминиевого литья; *7* – автоматические линии обработки валов-роторов АД с высотами оси вращения 56–71 мм; *8* – то же АД с высотами оси вращения 112–132 мм; *9* – автоматизированный склад сердечников роторов; *10* – то же статоров; *11* – АТК обмотки АД с высотами оси вращения 56–71 мм; *12* – то же с высотами оси вращения 112–132 мм; *13* – стеллажно-тарный автоматизированный склад СТАС-50; *14* – автоматизированный склад обмотанных сердечников статоров; *15* – автоматизированные склады; *16* – главный автоматизированный магазин; *17* – автоматизированный склад изоляционных материалов; *18* – то же оснастки; *19* – то же деталей сборочного отделения

Таблица 10.11

Наименование	Тип ЭВМ и ее краткие технические данные
АСУ П	ЭВМ ЕС-1045.01. Производительность 870 тыс. операций/с, системный интерфейс ЕС ЭВМ, оперативная память 4 Мбайт. Совместима по программному обеспечению и системному интерфейсу с ЭВМ типа ЕС ЭВМ
АСУ ТП участка обработки станин	Мини-ЭВМ СМ1420. Производительность 250 тыс. операций/с, системный интерфейс ОШ (общая шина), оперативная память 128 Кбайт. Совместима с мини-ЭВМ типа СМ3, СМ4 по программному обеспечению и системному интерфейсу
АСУ ТП участка обработки щитов	То же
АСУ ТП участка вал-ротор	"
АСУ ТП участка обмотки	"
АСУ ТП участка сборки	Мини-ЭВМ СМ1420. Производительность 250 тыс. операций/с, системный интерфейс ОШ (общая шина), оперативная память 128 Кбайт. Совместима с мини-ЭВМ типа СМ3, СМ4 по программному обеспечению и системному интерфейсу
АСУ ТП участка гальваники	Микро-ЭВМ СМ1300. Производительность 200 тыс. операций/с, системный интерфейс ОШ (общая шина), оперативная память 64 Кбайт. Совместима с мини-ЭВМ типа СМ3, СМ4 по программному обеспечению и системному интерфейсу
АТК обработки станин	Командоконтроллер РС-2000
АТК обработки щитов	То же
АТК вал-ротор	"
АТК сборки	Управляющий вычислительный комплекс УВК-2. Производительность 200 тыс. операций/с, системный интерфейс "Канал" (общая шина), оперативная память 32 Кбайт. Совместима по программному обеспечению с мини-ЭВМ типа СМ3
АТК обмотки	Мини-ЭВМ СМ1420. Производительность 250 тыс. операций/с, системный интерфейс ОШ (общая шина), оперативная память 128 Кбайт. Совместима по программному обеспечению и системному интерфейсу с мини-ЭВМ типа СМ3, СМ4
АСУ ТП "Склад"	Микро-ЭВМ СМ1300. Производительность 200 тыс. операций/с, системный интерфейс ОШ (общая шина), оперативная память 64 Кбайт. Совместима с мини-ЭВМ типа СМ3, СМ4 по программному обеспечению и системному интерфейсу

Таблица 10.11 (продолжение)

Наименование	Тип ЭВМ и ее краткие технические данные
АСУ ТП "Транспорт"	То же
АСУ ТП подвесного толкающего конвейера	"

дисплейно-информационно-справочная подсистема (10 задач);

информационное обеспечение (20 задач).

Системы АСУ ТП (нижний уровень) решают задачи оперативного управления технологическими процессами, объединяют высший уровень АСУ с нижним АСУ ОТ. Задания (планы) задаются верхним уровнем. Через средства АСУ ОТ (технические, программные, организационные) они передаются нижнему уровню, где средства АСУ ТП реализуют заданные планы на технологических объектах управления (ТОУ). Обратную связь (данные о выполнении плана, о состоянии ТОУ, о наличии трудовых, материальных ресурсов и т.д.) осуществляют средства АСУ ОТ.

Средства АСУ ТП дают информацию руководящим звеньям — цехам, участкам, средства АСУ ОТ — оперативную информацию руководству завода и функциональным службам для планирования, учета, технической подготовки производства, управления качеством продукции.

АСУ ТП "Транспорт" управляет автоматизированным межскладским транспортом, обеспечивающим подачу материалов, комплектующих на рабочие места обработки и на автоматизированные склады.

АСУ ТП "Склады" управляет автоматизированными складами и обеспечивает выдачу материалов, комплектующих, готовых узлов на транспортную систему.

Взаимосвязь АСУ ОТ с АТК предъявляет к АТК требования:

принять и запомнить задание по взаимодействию со смежными АСУ ТП или другим оборудованием на входе и выходе;

на основе задания на входе и выходе составить план собственной деятельности с учетом текущего состояния для обеспечения запланированного объема материальных потоков;

обеспечить возможность оперативного извещения вышестоящего уровня о невозможности выполнения плана с указанием причин и степени невыполнения как в процессе планирования, так и в процессе выполнения, а также управление технологическим оборудованием и производственными процессами в соответствии с внутренним планом и сбор информации о текущем состоянии объекта в объеме, необходимом вышестоящим уровням управления.

АСУ ОТ должна обеспечивать единство целей функционирования АТК путем разработки и возможной корректировки при необходимости графиков их работы в реальном масштабе времени в пределах суток.

П р и л о ж е н и е. Основные технические данные двигателей серии АИ

Тип двигателя	Мощность, кВт	КПД, %	$\cos\varphi$	s_N, %	T_l	T_b	T_u	I_l	Уровень звука, дБ (по шкале А)	Момент инерции, кг·м^2	Масса, кг
Синхронная частота вращения 3000 об/мин											
АИР50А2	0,09	60	0,75	11,5	2,2	2,2	1,8	4,5	60	0,000025	2,5
АИР50В2	0,12	63	0,75	11,5	2,2	2,2	1,8	4,5	60	0,000028	2,8
АИР56А2	0,18	68	0,78	9	2,2	2,2	1,8	5	61	0,00042	3,4
АИР56В2	0,25	69	0,79	9	2,2	2,2	1,8	5	61	0,00047	3,9
АИР63А2	0,37	72	0,86	9	2,2	2,2	1,8	5	61	0,00076	4,7
АИР63В2	0,55	75	0,85	9	2,2	2,2	1,8	5	61	0,0009	5,45
АИР71А2	0,75	78,5	0,83	6	2,1	2,2	1,6	6	60	0,00097	6,5
АИР71В2	1,1	79	0,83	6,5	2,1	2,2	1,6	6	60	0,0011	8,8
АИР80А2	1,5	81	0,85	5	2,1	2,2	1,6	7	65	0,0018	9,8
АИР80В2	2,2	83	0,87	5	2	2,2	1,6	7	65	0,0021	13,2
АИР90L2	3	84,5	0,88	5	2	2,2	1,6	7	68	0,0035	16,7
АИР100S2	4	87	0,88	5	2	2,2	1,6	7,5	68	0,0059	21,6
АИР100L2	5,5	88	0,89	5	2	2,2	1,6	7,5	68	0,0075	27,4
АИР112М2	7,5	87,5	0,88	3,5	2	2,2	1,6	7,5	75	0,01	41
АИР132М2	11	88	0,9	3	1,6	2,2	1,2	7,5	77	0,023	64
АИР160S2	15	90	0,89	3	1,8	2,7	1,7	7	80	0,039	100
АИР160М2	18,5	90,5	0,9	3	2	2,7	1,8	7	80	0,043	110
АИР180S2	22	90,5	0,89	2,7	2	2,7	1,9	7	81	0,057	160
АИР180М2	30	91,5	0,9	2,5	2,2	3	1,9	7,5	82	0,07	180
АИР200М2	37	91,5	0,87	2	1,6	2,8	1,5	7	82	0,13	220
АИР200S2	45	92	0,88	2	1,8	2,8	1,5	7,5	82	0,14	240
АИР225М2	55	92,5	0,91	2	1,8	2,6	1,5	7,5	82	0,22	320
АИР250S2	75	93	0,9	2	1,8	3	1,6	7,5	85	0,41	425
АИР250М2	90	93	0,92	2	1,8	3	1,6	7,5	86	0,46	455
Синхронная частота вращения 1500 об/мин											
АИР50А4	0,06	53	0,63	11	2,3	2,2	1,8	4,5	50	0,000029	2,6
АИР50В4	0,09	57	0,65	11	2,3	2,2	1,8	4,5	50	0,000033	2,9
АИР56А4	0,12	63	0,66	10	2,3	2,2	1,8	5	56	0,00070	3,35
АИР56В4	0,18	64	0,68	10	2,3	2,2	1,8	5	56	0,00079	3,9
АИР63А4	0,25	68	0,67	12	2,3	2,2	1,8	5	56	0,0012	4,7
АИР63В4	0,37	68	0,7	12	2,3	2,2	1,8	5	56	0,0014	5,6
АИР71А4	0,55	70,5	0,7	9,5	2,3	2,2	1,8	5	56	0,0013	7,8
АИР71В4	0,75	73	0,76	10	2,2	2,2	1,6	5	56	0,0014	8,8
АИР80А4	1,1	75	0,81	7	2,2	2,2	1,6	5,5	56	0,0032	9,9
АИР80В4	1,5	78	0,83	7	2,2	2,2	1,6	5,5	58	0,0033	12,1
АИР90L4	2,2	81	0,83	7	2,1	2,2	1,6	6,5	58	0,0056	17
АИР100S4	3	82	0,83	6	2	2,2	1,6	7	62	0,0087	21,6
АИР100L4	4	85	0,84	6	2	2,2	1,6	7	62	0,011	27,3
АИР112М4	5,5	85,5	0,86	4,5	2	2,5	1,6	7	65	0,017	41
АИР132S4	7,5	87,5	0,86	4,0	2	2,5	1,6	7,5	69	0,028	58
АИР132М4	11	87,5	0,87	3,5	2	2,7	1,6	7,5	69	0,04	70
АИР160S4	15	90	0,89	3	1,9	2,9	1,8	7	70	0,078	100
АИР160М4	18,5	90,5	0,89	3	1,9	2,9	1,8	7	70	0,1	110
АИР180S4	22	90,5	0,87	2,5	1,7	2,4	1,5	7	73	0,15	170
АИР180М4	30	92	0,87	2	1,7	2,7	1,5	7	74	0,19	190
АИР200М4	37	92,5	0,89	2	1,7	2,7	1,6	7,5	74	0,28	245
АИР200L4	45	92,5	0,89	2	1,7	2,7	1,6	7,5	74	0,34	270
АИР225М4	55	93	0,89	2	1,7	2,6	1,6	7	75	0,51	335
АИР250L4	75	94	0,88	1,5	1,7	2,5	1,4	7,5	77	0,89	450
АИР250М4	90	94	0,89	1,5	1,5	2,5	1,3	7,5	78	1,1	480
АИР280S4	110	93,5	0,91	2,2	1,6	2,2	1	6,5	84	2,3	594
АИР280М4	132	94	0,93	2,2	1,6	2,2	1	6,5	84	2,5	752
АИР315S4	160	93,5	0,91	2	1,4	2	1	5,5	84	3,1	896
АИР315М4	200	94	0,92	2	1,4	2	0,9	5,5	84	3,6	1000
АИР355S4	250	94,5	0,92	2	1,4	2	0,9	7	86	6	1275
АИР355М4	315	94,5	0,92	2	1,4	2	0,9	7	86	7	1480

Приложение (продолжение)

Тип двигателя	Мощность, кВт	КПД, %	$\cos\varphi$	s_N, %	T_l	T_b	T_u	I_l	Уровень звука, дБ (по шкале А)	Момент инерции, кг·м^2	Масса, кг
Синхронная частота вращения 1000 об/мин											
АИР63А6	0,19	56	0,62	14	2	2,2	1,6	4	53	0,0018	4,65
АИР63В6	0,25	59	0,62	14	2	2,2	1,6	4	53	0,0022	5,6
АИР71А6	0,37	65	0,65	8,5	2	2,2	1,6	4,5	55	0,0017	7,8
АИР71В6	0,55	68,5	0,7	8,5	2	2,2	1,6	4,5	55	0,002	8,6
АИР80А6	0,76	70	0,72	8	2	2,2	1,6	4,5	55	0,0031	11,6
АИР80В6	1,1	74	0,74	8	2	2,2	1,6	4,5	55	0,0046	13,4
АИР90L6	1,5	76	0,72	7,5	2	2,2	1,6	6	55	0,0073	16,9
АИР100L6	2,2	81	0,74	5,5	2	2,2	1,6	6	55	0,013	22,8
АИР112МА6	3	81	0,76	5	2	2,2	1,6	6	62	0,017	35
АИР112МВ6	4	82	0,81	5	2	2,2	1,6	6	62	0,021	40,4
АИР132S6	5,5	85	0,8	4	2	2,2	1,6	7	64	0,04	57
АИР132М6	7,5	85,5	0,81	4	2	2,2	1,6	7	67	0,058	68
АИР160S6	11	88	0,83	3	2	2,7	1,6	6,5	63	0,12	100
АИР160М6	15	88	0,85	3	2	2,7	1,6	6,5	67	0,15	120
АИР180М6	18,5	89,5	0,85	2	1,8	2,4	1,6	6,5	67	0,2	180
АИР200М6	22	90	0,83	2	1,6	2,4	1,4	6,5	67	0,36	225
АИР200L6	30	90	0,85	2,5	1,6	2,4	1,4	6,5	67	0,4	250
АИР225М6	37	91	0,85	2	1,5	2,3	1,4	6,5	68	0,61	305
АИР250S6	45	92,5	0,85	2	1,5	2,3	1,4	6,5	69	1	390
АИР250М6	55	92,5	0,86	2	1,5	2,3	1,4	6,5	69	1,1	430
АИР280S6	75	92,5	0,9	2,2	1,3	2,2	1	6,5	70	2,9	637
АИР280М6	90	93	0,9	2,2	1,4	2,4	1	6,5	79	3,4	702
АИР315S6	110	93	0,92	2,3	1,4	2,3	1	6	79	4	847
АИР315М6	132	93,5	0,9	2,3	1,4	2,3	1	6,5	81	4,5	950
АИР355S6	160	94	0,9	2,2	1,6	2	1	7	81	7,3	1136
АИР355М5	200	94,5	0,9	2,2	1,6	2	0,9	7	81	8,8	1280
Синхронная частота вращения 750 об/мин											
АИР71В8	0,25	56	0,65	8	1,8	1,9	1,4	4	52	0,0019	7,8
АИР80А8	0,37	60	0,61	6,5	1,8	1,9	1,4	4	52	0,0034	13,8
АИР80В8	0,55	64	0,63	6,5	1,8	1,9	1,4	4	52	0,0041	13,5
АИР90LА8	0,75	70	0,66	7	1,6	1,7	1,2	3,5	52	0,0067	19,7
АИР90LВ8	1,1	72	0,70	7	1,6	1,7	1,2	3,5	52	0,0086	22,3
АИР100L8	1,5	76	0,73	6	1,6	1,7	1,2	5,5	54	0,013	31,3
АИР112МА8	2,2	76,5	0,71	5,5	1,8	2,2	1,4	6	60	0,017	36
АИР112МВ8	3	79	0,74	5,5	1,8	2,2	1,4	6	62	0,025	41
АИР132S8	4	83	0,7	4,5	1,8	2,2	1,4	6	62	0,042	56
АИР132М8	5,5	83	0,74	5	1,8	2,2	1,4	6	62	0,057	70
АИР160S8	7,5	87	0,75	3	1,6	2,4	1,4	5,5	63	0,12	100
АИР160М8	11	87,5	0,75	3	1,6	2,4	1,4	6	64	0,15	120
АИР180М8	15	89	0,82	2,5	1,6	2,2	1,5	5,5	65	0,23	180
АИР200М8	18,5	89	0,81	2,5	1,6	2,3	1,4	6	65	0,36	225
АИР200L8	22	90	0,81	2,5	1,6	2,3	1,4	6	65	0,4	250
АИР225М8	30	90,5	0,81	2,5	1,4	2,3	1,3	6	65	0,61	305
АИР250S8	37	92,5	0,78	2	1,5	2,3	1,4	6	65	1,1	400
АИР250М8	45	92,5	0,79	2	1,4	2,2	1,3	6	65	1,2	430
АИР280S8	55	92	0,86	3	1,3	2,2	1	6	71	3,2	643
АИР280М8	75	93	0,87	3	1,4	2,2	1	6	74	4,1	735
АИР315S8	90	93	0,85	1,5	1,2	2,2	1	6	74	4,9	927
АИР315М8	110	93	0,86	1,5	1,1	2,2	0,9	6	74	5,8	1001
АИР355S8	132	93,5	0,85	2	1,2	2	0,9	6,5	77	9	1175
АИР355М8	160	93,5	0,85	2	1,2	2	0,9	6,5	77	10	1280

Основные технические данные двухскоростных двигателей серии АИ

Тип двигателя	Мощность, кВт	При номинальной мощности: Частота вращения, об/мин	Ток статора, А при 380 В	КПД, %	cos φ	I_l	T_l	T_u	T_b	Момент инерции кг · м^2	Масса, кг
Синхронная частота вращения 3000/1500 об/мин. Схема соединения обмотки Δ/YY											
АИР56А4/2	0,1	1400	0,55	45	0,61	3,5	1,8	1	2,1	0,00007	3,6
	0,14	2800	0,55	50	0,7	4	1,5	0,8	2,1		
АИР56В4/2	0,12	1330	0,6	49	0,62	3,5	1,6	1	1,9	0,000038	3,9
	0,18	2660	0,67	57	0,72	4	1,6	0,8	1,9		
АИР63А4/2	0,19	1448	0,79	55	0,66	3,5	1,6	1	1,8	0,0012	5
	0,265	2880	0,88	61	0,75	4	1,2	0,8	1,8		
АИР63В4/2	0,265	1448	1,03	57	0,70	3,5	1,6	1	2	0,0015	5,7
	0,37	2880	1,06	61	0,88	4	1,2	0,8	1,7		
АИР71А4/2	0,48	1365	1,27	70	0,82	4,5	1,5	1,4	1,9	0,0013	8,1
	0,62	2775	1,53	69	0,89	4,5	1,5	1,3	1,9		
АИР71В4/2	0,71	1365	1,76	73	0,84	4,5	1,75	1,5	1,9	0,0015	9,3
	0,85	2775	2,06	73	0,86	4,5	1,85	1,4	2		
АИР80А4/2	1,12	1410	2,96	74	0,78	5	1,9	1,6	2,2	0,0034	12,2
	1,5	2730	3,63	73	0,86	5	1,9	1,5	2		
АИР80В4/2	1,5	1410	3,85	75	0,79	5	2	1,6	2	0,0035	14,6
	2	2760	4,7	75	0,86	5	2	1,5	2,1		
АИР90L4/2	2	1405	4,7	77	0,84	4,5	2,1	1,7	2,3	0,0056	19,7
	2,65	2775	4,49	78	0,94	5	2	1,6	2,1		
АИР100S4/2	3	1425	6,62	82	0,84	5,5	2	1,6	2,4	0,0085	23,7
	3,75	2850	7,91	80	0,90	5,5	2	1,6	2,4		
АИР100L4/2	4,25	1410	8,95	82	0,88	5,5	2,0	1,6	2,2	0,011	30
	4,75	2850	9,57	82	0,92	6	2,2	1,6	2,4		
АИР112М4/2	4,2	1440	8,84	83	0,87	6,5	1,6	1,2	2	0,016	41,5/49
	5,3	2870	11,08	79	0,92	6,5	1,7	1	2,2		
АИР132S4/2	6,0	1455	12,11	86,5	0,87	7,5	1,5	1,2	2,7	0,027	58/70
	7,1	2910	14,96	81	0,89	7,5	1,5	1	2,7		
АИР132М4/2	8,5	1455	16,96	87,5	0,87	7,5	2	1,2	2,5	0,038	70,5/83,5
	9,5	2925	19,32	83	0,9	7,5	1,8	1	3		
АИР160S4/2	11	1460	22,2	89,5	0,84	7	1,6	1,6	2,9	0,08	100/130
	14	2900	27,6	85,5	0,90	7	1,6	1	2,9		
АИР160М4/2	14	1465	27,6	89,5	0,86	7	1,5	1,5	2,9	0,1	110/145
	17	2925	32,8	86,5	0,91	7	1,6	1	2,9		
АИР180 S4/2	18,5	1470	36,7	90	0,85	6,5	1,6	1,4	2,4	0,16	170
	21	2940	42,2	85	0,89	6,5	1,4	1,3	2,4		
АИР180М4/2	22	1470	41,7	91	0,88	7	1,6	1,4	2,7	0,2	190
	27	2940	50,7	88	0,92	7	1,7	1	2,7		
АИР200М4/2	27,5	1470	54,7	92	0,83	7	2,2	2,1	2,5	0,27	245
	34	2940	63,8	90	0,9	7,3	1,6	1,4	2,5		
АИР200L4/2	33,5	1465	65	91	0,86	7,0	2	1,7	2,1	0,32	270
	38,5	2940	69,9	91	0,92	7,3	1,8	1,4	2,3		
АИР225М4/2	42	1480	82,2	92,5	0,84	7	2,2	1,9	2,4	0,5	340
	48	2955	90,5	90,5	0,89	7,5	2	1,7	2,4		
Синхронная частота вращения 750/1500 об/мин. Схема соединения обмотки Δ/YY											
АИР90L8/4	0,8	710	327	62	0,6	3	1,7	1,6	2	0,0075	19,3
	1,32	1410	3,11	75	0,86	5	1,5	1,3	2		
АИР100S8/4	1	720	3,56	70	0,61	4	1,2	1,1	2	0,0096	22,4
	1,7	1425	3,76	78	0,88	5	1,1	1	1,8		
АИР100L8/4	1,4	720	4,8	74	0,6	4	1,6	1,5	2,1	0,012	26,7
	2,36	1425	4,97	81	0,89	5,5	1,4	1	1,9		
АИР112МА8/4	1,9	710	5,57	74	0,7	5	1,5	1,2	1,8	0,017	36/43,5
	3	1420	6,83	75	0,89	6	1,2	1	2		

Тип двигателя	Мощность, кВт	При номинальной мощности: Частота вращения, об/мин	Ток статора, А при 380 В	КПД, %	cos φ	I_l	T_l	T_u	T_b	Момент инерции кг · м^2	Масса, кг
АИР112МВ8/4	2,2	715	6,3	77	0,69	5	1,8	1,2	2,4	0,025	41/48,5
	3,6	1425	7,97	78	0,88	6	1,3	1	2,2		
АИР132S8/4	3,6	720	8,78	80	0,79	5,5	1,5	1,2	2	0,042	56,5/68,5
	5,3	1440	11	81	0,9	6	1,3	1	2		
АИР132М8/4	5	715	13	80	0,73	5,5	1,9	1,2	2,5	0,057	70,0/82
	7,5	1440	16	82	0,87	7,5	1,2	1	2,4		
АИР160S8/4	6	730	16,7	78	0,7	5,5	1,5	1	2	0,12	100/125
	9	1460	18,5	83	0,89	7	1,2	0,8	2		
АИР160М8/4	9	730	23,6	81,5	0,71	5,5	1,5	1	2	0,15	120/155
	13	1460	26,4	84	0,89	7	1,2	0,8	2		
АИР180М8/4	13	730	30,9	86,5	0,74	6	1,8	1,6	2,7	0,25	180
	18,5	1455	35,3	87,5	0,91	7	1,5	1	2,4		
АИР200М8/4	17	735	39,8	86,5	0,75	5,5	1,5	1,3	1,8	0,41	240
	25	1465	47,7	87,5	0,91	6	1,4	1,1	2		
АИР200L8/4	20	735	46,3	87,5	0,75	5,5	1,5	1,3	1,8	0,46	265
	28	1465	53,1	88	0,91	6	1,4	1,1	2		
АИР225М8/4	23	735	53,9	90	0,72	6	2,3	1,8	2,3	0,69	325
	34	1470	63,8	90	0,90	7	1,6	1,4	2,3		
Синхронная частота вращения 1000/1500 об/мин. Две независимые обмотки. Схема соединения обмотки YYY/YYY											
АИР90L6/4	1,32	950	3,82	72	0,73	4	1,6	1,5	2,2	0,0073	20,5
	1,80	1440	4,33	77	0,82	5	1,5	1,2	2,3		
АИР100S6/4	1,70	935	4,36	76	0,78	4,5	1,3	1,3	1,8	0,0085	22,3
	2,24	1420	4,83	80	0,88	5,5	1,3	1,2	1,9		
АИР100L6/4	2,12	945	5,65	77	0,74	4,5	1,4	1,3	2	0,013	28,2
	3,15	1425	6,96	80	0,86	4,5	1,5	1,4	2,1		
АИР112М6/4	3,2	970	9,1	77,5	0,69	5,5	2,0	1,2	2,7	0,017	40,5/48
	4,5	1435	9,8	80	0,87	6	1,5	1	2,1		
АИР132S6/4	5	965	12,4	82	0,75	5,5	1,5	1,2	2,5	0,038	56,5/68,5
	5,5	1440	11,3	82	0,9	5,5	1,5	1	2,2		
АИР132М6/4	6,7	970	15,9	84,5	0,76	6	1,9	1,3	2,6	0,055	68,5/81,5
	7,5	1440	15,1	84	0,9	6	1,5	1	2,2		
Схема соединения YY/Δ											
АИР160S6/4	7,5	975	16,9	86,5	0,78	6,5	1,8	1,7	2,8	0,12	100/125
	8,5	1455	16,4	87,5	0,9	6	1,5	1,3	2,2		
АИР160М6/4	11	975	24,2	87,5	0,79	6,5	1,7	1,7	2,8	0,15	120/155
	13	1455	24,7	88	0,91	6	1,4	1,3	2,1		
АИР180М6/4	15	980	34,0	87	0,77	6,5	2,2	2,0	3	0,24	180
	17	1455	33,0	87	0,9	6,0	1,6	1,5	2,3		
АИР200М6/4	20	985	42,2	89	0,81	6,5	1,9	1,8	2,3	0,41	240
	22	1470	42,2	89	0,89	6	1,5	1,4	1,9		
АИР200L6/4	25	980	56,8	88	0,76	7	2,3	2,2	2,5	0,46	265
	28	1465	54	88,5	0,89	6	1,8	1,5	2		
Синхронная частота вращения 750/1000 об/мин. Две независимые обмотки. Схема соединения YYY/YYY											
АИР100S8/6	1	720	3,20	72	0,66	4	1,5	1,4	2,1	0,0085	21,7
	1,25	970	3,43	77	0,72	5,5	1,5	1	2,2		
АИР100L8/6	1,32	710	4,22	71	0,67	4	1,6	1,4	1,9	0,012	26,7
	1,8	955	4,67	76	0,77	5	1,4	0,9	2		
АИР112МА8/6	1,7	720	5,8	73	0,61	5	1,9	1,2	2,2	0,017	35,5/43,5
	2,2	960	6,37	76	0,75	5,5	1,2	1	2,2		
АИР112МВ8/6	2,2	720	6,77	76	0,65	5	2	1,2	2,2	0,025	40,5/48,5
	2,8	960	6,9	78	0,79	5,5	1,4	1,0	2,2		

П р и л о ж е н и е (продолжение)

Тип двигателя	Мощность, кВт	При номинальной мощности: Частота вращения, об/мин	Ток статора, А при 380 В	КПД, %	cos φ	I_l	T_l	T_u	T_b	Момент инерции кг · м²	Масса, кг
АИР132S8/6	3,2	725	8,92	79	0,69	5,5	1,5	1,2	2,2	0,042	56,5/68,5
	4	965	9,38	80	0,81	6	1,5	0,8	2,2		
АИР132М8/6	4,5	725	11,1	84	0,73	5,5	1,7	1,2	2,4	0,057	68,5/81,5
	5,5	970	12	84	0,83	6	1,5	1	2,4		
АИР160S8/6	7,5	720	18,2	84,5	0,74	5	1,6	1,5	2,2	0,12	100/125
	8,5	970	18,1	86	0,83	6	1,4	1,3	2,2		
АИР160М8/6	11	725	26,9	85	0,73	5,5	1,8	1,7	2,4	0,15	120/155
	13	970	27,8	86,5	0,82	6,5	1,6	1,5	2,4		
АИР180М8/6	13	735	28,4	87	0,8	6	1,5	1,2	2,3	0,25	180
	15	985	29,4	89	0,87	7	1,9	1,4	2,9		
АИР200М8/6	15	735	34	89,5	0,75	6	2,3	2	2,2	0,41	240
	19	980	37,9	89,5	0,85	6	1,9	1,5	2		
АИР200L8/6	18,5	735	41,6	90	0,75	6	2,2	1,9	2,2	0,46	265
	23	980	45,1	90	0,86	6	2,0	1,6	2,1		
АИР225М8/6	30	735	70,3	90	0,72	6	2,2	2	2,5	0,69	325
	37	980	72,7	91	0,85	6,5	2	1,9	2,5		
С и н х р о н н а я ч а с т о т а в р а щ е н и я 500/3000 об/мин											
АИР112М12/2	0,7	460	3,9	53,5	0,51	2,5	1,7	1,5	2,1	0,017	49
	2,8	2880	6,66	71,0	0,90	5,5	1,6	0,8	2,7		
С и н х р о н н а я ч а с т о т а в р а щ е н и я 500/1000 об/мин. С х е м а с о е д и н е н и я о б м о т к и Δ/YY											
АИР112МВ12/6	0,7	465	4,52	49	0,48	3	2,5	2	2,8	0,025	48
	1,8	890	4,38	71	0,88	4	1,5	1,2	1,8		
АИР160S12/6	3,5	485	14,7	71	0,51	4	1,6	1,5	2,5	0,12	100/125
	7,1	965	14,4	85	0,88	5	1,2	1	2,1		
АИР160М12/6	4,5	48,5	18	74,5	0,51	4	1,8	1,6	2,6	0,15	120/155
	10	96,0	20,3	85	0,88	5	1,2	1	2		
АИР180М12/6	7,5	490	21,9	80	0,65	4,5	1,6	1,3	2,1	0,25	180
	13	980	25,4	86,5	0,9	6	1,4	1	2,1		
АИР200М12/6	9	490	27,6	82,5	0,6	4	1,5	1,4	1,8	0,41	240
	14	980	28,1	89	0,85	6,5	1,7	1,5	2		
АИР200/12/6	10	485	30,3	83,5	0,6	4	1,7	1,5	1,8	0,46	265
	17	975	33,6	89,5	0,86	6	1,7	1,5	2,1		
АИР225М12/6	13	485	39,2	84	0,6	4	1,6	1,5	1,8	0,69	325
	22	980	43,2	90	0,86	6	1,4	1,5	2		

ОГЛАВЛЕНИЕ